



Practitioner's Docket No. 59559 (70551)
PATENT

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re application of: M. Hamamoto, et al.
Application No.: 10/618,301 Group No.: Not Yet Assigned
Filed: July 11, 2003 Examiner: Not Yet Assigned
For: RISING AND MOVING APPARATUS AND MANUFACTURING METHOD
THEREOF

Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

TRANSMITTAL OF CERTIFIED COPIES

Attached please find the certified copy of the foreign application from which priority is claimed for this case:

Country: JAPAN
Application Number: 2002-204428
Filing Date: July 12, 2002

Country: JAPAN
Application Number: 2003-192944
Filing Date: July 7, 2003

CERTIFICATE OF MAILING (37 C.F.R. SECTION 1.8a)

I hereby certify that this paper (along with any paper referred to as being attached or enclosed) is being deposited with the United States Postal Service on the date shown below with sufficient postage as first class mail in an envelope addressed to the Commissioner for Patents, P.O. Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450

Date: December 9, 2003

Kathryn A. Grindrod
(type or print name of person mailing paper)
Kathryn A. Grindrod
Signature of person mailing paper

WARNING: *"When a document that is required by statute to be certified must be filed, a copy, including a photocopy or facsimile transmission of the certification is not acceptable." 37 C.F.R. section 1.4(f) (emphasis added).*

Date: December 9, 2003

David A. Tucker
SIGNATURE OF PRACTITIONER

Reg. No.: 27,840

David A. Tucker
(type or print name of practitioner)

Tel. No.: (617) 517-5508

Edwards & Angell, LLP

P.O. Box 9169
P.O. Address

Customer No.: 21874

Boston, MA 02209

NOTE: *"The claim to priority need be in no special form and may be made by the attorney or agent, if the foreign application is referred to in the oath or declaration, as required by section 1.63." 37 C.F.R. section 1.55(a).*

357455

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日

Date of Application:

2002年 7月12日

出 願 番 号

Application Number:

特願2002-204428

[ST.10/C]:

[JP2002-204428]

出 願 人

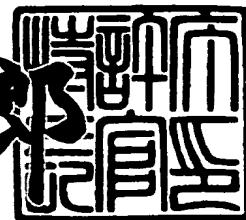
Applicant(s):

シャープ株式会社

2003年 6月17日

特 許 庁 長 官
Commissioner,
Japan Patent Office

太田 信一郎



出証番号 出証特2003-3047209

【書類名】 特許願

【整理番号】 1021077

【提出日】 平成14年 7月12日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 A61B 5/10

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市阿倍野区長池町 2 2 番 2 2 号 シャープ株式会社内

【氏名】 濱本 将樹

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市阿倍野区長池町 2 2 番 2 2 号 シャープ株式会社内

【氏名】 太田 佳似

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市阿倍野区長池町 2 2 番 2 2 号 シャープ株式会社内

【氏名】 原 圭太

【特許出願人】

【識別番号】 000005049

【住所又は居所】 大阪府大阪市阿倍野区長池町 2 2 番 2 2 号

【氏名又は名称】 シャープ株式会社

【代理人】

【識別番号】 100064746

【弁理士】

【氏名又は名称】 深見 久郎

【選任した代理人】

【識別番号】 100085132

【弁理士】

【氏名又は名称】 森田 俊雄

【選任した代理人】

【識別番号】 100083703

【弁理士】

【氏名又は名称】 仲村 義平

【選任した代理人】

【識別番号】 100096781

【弁理士】

【氏名又は名称】 堀井 豊

【選任した代理人】

【識別番号】 100098316

【弁理士】

【氏名又は名称】 野田 久登

【選任した代理人】

【識別番号】 100109162

【弁理士】

【氏名又は名称】 酒井 將行

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 008693

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 0208500

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 浮上移動装置およびその製造方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 本体が停空飛翔可能かつ移動可能な程度において、周囲の流体から受ける力により弾性変形する羽部と、

該羽部を駆動する駆動部と、

該駆動部の駆動態様を制御する制御部とを備えた、浮上移動装置。

【請求項 2】 前記羽部は、流体の上流側のねじり剛性または曲げ剛性が、流体の下流側のねじり剛性または曲げ剛性よりも高い、請求項 1 に記載の浮上移動装置。

【請求項 3】 前記羽部は、該羽部の前縁側のねじり剛性または曲げ剛性が、該羽部の後縁側のねじり剛性または曲げ剛性よりも高い、請求項 1 に記載の浮上移動装置。

【請求項 4】 前記羽部の流体の上流側には、前記羽部の翼幅方向に沿って稜線または谷線が延びる波板構造が設けられている、請求項 2 に記載の浮上移動装置。

【請求項 5】 前記羽部の前縁側には、前記羽部の翼幅方向に沿って稜線または谷線が延びる波板構造が設けられている、請求項 3 に記載の浮上移動装置。

【請求項 6】 前記羽部は、流体の上流側の厚みが流体の下流側の厚みに比較して厚いか、または、前記羽部を支持する支持構造は、流体の上流側の太さが流体の下流側の太さに比較して太い、請求項 2 に記載の浮上移動装置。

【請求項 7】 前記羽部は、該羽部の前縁側の厚みが、該羽部の後縁側の厚みに比較して厚いか、または、前記羽部を支持する支持構造は、該羽部の前縁側の太さが前記羽部の後縁側の太さに比較して太い、請求項 3 に記載の浮上移動装置。

【請求項 8】 前記羽部は、流体の流速が相対的に大きい部位においては、流体の流速が相対的に小さい部位に比較して、迎え角が小さい、請求項 1 に記載の浮上移動装置。

【請求項 9】 前記羽部は、該羽部の付根部側に比較して、前記羽部の先端

部側の迎え角が大きい、請求項 1 に記載の浮上移動装置。

【請求項 1 0】 前記羽部は、所定の回転中心点回りに回転が可能であり、前記羽部の回転中心点に相対的に近い側の部位の曲げ剛性が、該回転中心点に相対的に遠い側の曲げ剛性に比較して高い、請求項 1 に記載の浮上移動装置。

【請求項 1 1】 前記羽部は、所定の回転中心点回りに回転が可能であり、前記羽部の回転中心点に相対的に近い側の部位のねじり剛性が、該回転中心点に相対的に遠い側のねじり剛性に比較して高い、請求項 1 に記載の浮上移動装置。

【請求項 1 2】 前記羽部は、前記回転中心点に近い側の厚みが前記回転中心点に遠い側の厚みに比較して厚いか、または、前記羽部を支持する支持構造は、前記回転中心点に近い側の太さが前記回転中心点に遠い側の太さに比較して太い、請求項 1 0 または 1 1 に記載の浮上移動装置。

【請求項 1 3】 前記羽部は、前記羽部の前縁と前記羽部の後縁とに沿って延びる回転軸が、前記羽部の前縁と前記羽部の後縁との間のほぼ中央部に位置するように設けられている、請求項 1 に記載の浮上移動装置。

【請求項 1 4】 前記制御部は、前記羽部の前記羽ばたき運動の両端死点における前記羽部の切り返しの動作の際に、該切り返し直前の前記羽部の前記羽ばたき運動により発生した渦の上方に前記羽部の下面が接触するように、前記駆動部を制御する、請求項 1 に記載の浮上移動装置。

【請求項 1 5】 前記制御部は、前記羽部の前記切り返しの際に、該切り返しにより発生する渦の回転中心軸が延びる方向と前記羽部の曲率中心軸が延びる方向とが一致するような弾性変形をするように、前記駆動部を制御する、請求項 1 に記載の浮上移動装置。

【請求項 1 6】 前記羽部は、前記駆動部により駆動されたとき、該羽部の部位によって弾性変形に位相差がある、請求項 1 に記載の浮上移動装置。

【請求項 1 7】 前記羽部は、該羽部の相対的に大きな流体力が及ぼされる部位の位相が、該羽部の相対的に小さな流体力が及ぼされる部位の位相に比較して遅れた位相遅れを有するように、弾性変形する、請求項 1 6 に記載の浮上移動装置。

【請求項 1 8】 前記羽部は、該羽部の先端部の位相が、該羽部の付根部の位相に比較して遅れた位相遅れを有するように、弾性変形する、請求項 1 6 に記載の浮上移動装置。

【請求項 1 9】 前記位相遅れが、前記羽ばたき運動の 1 周期の $1/2$ 以下である、請求項 1 7 または 1 8 に記載の浮上移動装置。

【請求項 2 0】 前記制御部が前記駆動部を制御する態様と、前記羽部の弾性変形の態様とは、流体・構造連成解析の結果、羽ばたき浮上移動に関する所定のパラメータが最も優れた値になるように関連付けられている、請求項 1 に記載の浮上移動装置。

【請求項 2 1】 前記羽ばたき浮上移動に関する所定のパラメータが、前記羽部の羽ばたき運動によって生じる浮上力である、請求項 2 0 に記載の浮上移動装置。

【請求項 2 2】 前記羽ばたき浮上移動に関する所定のパラメータが、前記羽部の羽ばたき運動によって生じる浮上力を、該浮上力を生じさせるときに前記羽部の駆動に必要なトルクで除算した値である、請求項 2 0 に記載の浮上移動装置。

【請求項 2 3】 前記羽ばたき浮上移動に関する所定のパラメータが、前記羽部の羽ばたき運動によって生じる浮上力を、該浮上力を生じさせるときの前記羽部の羽ばたき運動の周波数で除算した値である、請求項 2 0 に記載の浮上移動装置。

【請求項 2 4】 前記所定のパラメータが、前記羽部の羽ばたき運動によって生じる浮上力を、該浮上力を生じさせるために必要なエネルギーで除算した値である、請求項 2 0 に記載の浮上移動装置。

【請求項 2 5】 前記羽部は、前記羽部の羽ばたき周波数 f 、前記羽部の代表長さ L 、剛性が最も高い部位からの距離 r 、剛性が最も高い部位から距離 r の部位にかかる荷重 w 、荷重 w によって生じる変位 d とすると、

$$0.36 \times 10^{-8} < r^3 \times w / d / (L \times f)^2 < 4.48 \times 10^{-8}$$

の関係が成立する、請求項 1 に記載の浮上移動装置。

【請求項 2 6】 昆虫の羽の実物の構造に関する物理量を測定する羽構造測

定ステップと、

該羽構造測定ステップにおいて測定された前記羽の実物の構造に関する物理量が数値化され、前記羽の実物と等価とみなすことができる羽構造等価数値モデルを作成する羽構造等価数値モデル作成ステップと、

該羽構造等価数値モデルの剛性のパラメータが変更された複数種類の羽構造数値モデルを作成する羽構造数値モデル変更ステップと、

前記昆虫の羽の実物に羽ばたき運動をさせて、前記羽ばたき運動の態様に関する物理量を測定する羽ばたき運動態様測定ステップと、

前記羽ばたき運動の態様に関する物理量が数値化された羽ばたき運動数値モデルを作成する羽ばたき運動数値モデル作成ステップと、

予め設定された解析のための仮想流体内において、前記複数種類の羽構造数値モデルそれぞれに、前記羽ばたき運動数値モデルで表わされる前記羽ばたき運動を行なわせた際の、前記仮想流体の流体に関する数値モデルおよび前記羽構造数値モデルの構造に関する数値モデルそれぞれを、前記流体の挙動と前記構造物の挙動との相互作用を含めて数値モデル化する流体・構造連成解析を行なうことにより算出する流体・構造連成解析ステップと、

前記複数種類の羽構造数値モデルのうち、前記流体・構造連成解析ステップにより得られた前記仮想流体の流体に関する数値モデルおよび前記羽構造数値モデルの構造に関する数値モデルそれぞれのうちの所定のパラメータの値が最も優れた値である羽構造数値モデルを用いて、駆動装置により駆動される羽部を製造する羽部製造ステップとを備えた、浮上移動装置の製造方法。

【請求項 27】 前記所定のパラメータが、前記羽構造数値モデルを前記羽ばたき運動させたときに前記羽部に生じる浮上力である、請求項 26 に記載の浮上移動装置の製造方法。

【請求項 28】 前記所定のパラメータが、前記羽構造数値モデルを前記羽ばたき運動させたときに前記羽部に生じる浮上力を、該浮上力を生じさせるときに前記羽部の駆動に必要なトルクで除算した値である、請求項 26 に記載の浮上移動装置の製造方法。

【請求項 29】 前記所定のパラメータが、前記羽構造数値モデルを前記羽

ばたき運動させたときに前記羽部に生じる浮上力を、該浮上力を生じさせるときの前記羽部の羽ばたきの周波数で除算した値である、請求項 2 6 に記載の浮上移動装置の製造方法。

【請求項 3 0】 前記所定のパラメータが、前記羽構造数値モデルを前記羽ばたき運動させたときに前記羽部に生じる浮上力を、該浮上力を生じさせるために必要なエネルギーで除算した値である、請求項 2 6 に記載の浮上移動装置の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0 0 0 1】

【発明の属する技術分野】

本発明は、羽の羽ばたき運動により浮上かつ移動が可能な浮上移動装置および浮上移動装置の製造方法に関するものである。

【0 0 0 2】

【従来の技術】

近年、従来の航空機の飛行よりも機動性に優れている羽ばたき飛行の工学的実現を目指した研究が、盛んになっている。これは、非定常空気力学の解析手法の発達によるところが大きい。非定常空気力学の解析手法においては、一般的に、数十 Hz ～ 1 k Hz という高い周波数における運動の態様を解析できるようになっている。

【0 0 0 3】

また、文献 “Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight” (SCIENCE 1999 June VOL 284 pp.1954-1960) においては、M.Dickinsonらが次のようなことを行なったことが記載されている。

【0 0 0 4】

まず、ハエの羽の拡大模型を作成した。次に、浮遊するパーティクルを含む流体中で、そのハエの羽の拡大模型に、ハエの羽の羽ばたき運動に対して時間軸において相似な羽ばたき運動をさせた。その運動中において、レイノルズ数を等価にした状態でのパーティクルの運動を、画像処理を行なうことにより抽出した。それにより、ハエの羽ばたき飛行時における、流体の詳細な挙動と、ハエの羽に

発生する力との関係を求めた。

【0005】

彼らは、前述の文献中で、「最も揚力を得ることが困難なホバリング(停空飛翔)の解析において、次に示す1. 失速遅れ、2. 回転揚力および3. 後流捕獲の3つの手法を用いることが有効である」と提案している。

【0006】

1: 失速遅れ(Delayed stall)

通常の航空機では、羽に前縁渦と呼ばれる渦が発生して、その渦が羽から剥離することにより、羽が失速してしまう。しかしながら、羽ばたき飛行においては、失速が起こる前に羽を切り返すことにより、失速を防止することが可能である。しかも、羽ばたき飛行においては、前縁渦による揚力増大効果を得ることができる。

【0007】

2: 回転揚力(Rotational lift)

羽ばたき運動の1回のストロークの終端では、羽の運動方向が逆転する。そのため、羽の速度が落ちる。ただし、羽の長手方向(翼幅方向)を回転軸として羽を回転させるとともに、羽を並進運動(前後方向の運動)させることにより、羽上方における流体の絶対流速を羽下方における流体の絶対流速よりも大きくする。それにより、羽上方における圧力を羽下方における圧力より低下させる。その結果、羽に対して揚力が加えられる。そのため、羽ばたき運動の1回のストロークの終端での羽の速度の低下を補うことができる。また、同時に、羽の運動方向が逆転した後も、流体に対して適切な迎え角をとることができる。

【0008】

3: 後流捕獲(Wake capture)

羽ばたき運動の1回のストロークの終端から新たな運動方向に羽を運動させる際、以前の羽ばたきにおいて発生した、羽の運動方向と逆方向の流体の流れ(即ち後流)に羽をあてる。それにより、羽の運動と前述の後流の和に等しい速度で羽を運動させたときと同等の浮上力を得ることができる。また、羽ばたき運動の1回のストロークの終端から羽が運動を再開させる際の揚力の低下を補うことが

できる。

【0009】

以上の3つの浮上力発生メカニズムによって、羽ばたき飛行においてほぼ平均的に浮上力を得る手法を彼らは提案している。

【0010】

【発明の解決しようとする課題】

しかしながら、M.Dickinsonらの研究においては、羽は剛体であり、実質的に変形しないものとして仮定して解析がなされている。

【0011】

以下、変形を行わない羽は、空気力学的に羽ばたき飛行に対して悪影響を及ぼすことを、具体的に述べる。なお、以後特に断らない限り、流速とは羽に対する相対的な流れの速度を意味する、相対流速を指すものとする。また、これに対し、空間に固定された座標系に対する流体の速度を絶対流速と称する。

【0012】

1：失速遅れにおける効率低下

羽は支点を略中心とする回転運動を行っている。このため、羽の付根部分の運動速度と羽の先端部分の運動速度とが異なる。一般に、羽の迎え角に対して失速が起こる速度は一定である。また、平板の羽については羽の全領域で迎え角は一定である。したがって、羽の先端部において失速遅れを効果的に利用しようとする、羽の付根部分側では失速遅れ現象が利用できない。そのため、羽の失速遅れを効率的に利用することができない。羽の根元側では失速遅れ現象を利用するために、羽の迎え角を部位によって異ならせることが考えられる。しかしながら、羽の往復運動の一方の進行方向の運動に対しては適した迎え角になっても、羽の往復運動の他方の進行方向の運動に対しては全く適さない迎え角になってしまう。

【0013】

2：羽ばたき運動における反力により生じる不安定性

羽ばたき運動においては、自重を支えるだけの浮上力を得るため、羽にはほぼ自重以上の力が負荷される。上述の文献によると、羽の運動方向の変化、および

、羽の流体に対する迎え角の変化により、羽に加えられる力の方向は、羽に羽ばたき運動をさせる羽駆動部の垂直上方から水平方向にまで羽ばたきの動作に伴い変化する。羽に加えられる力は、剛体の羽においては羽駆動部に位相遅れを伴うことなく直接伝搬する。そのため、羽駆動部は、羽に加えられる力の反作用を受けて大きく空中で姿勢または位置が変化する。

【0014】

このとき、羽駆動部（アクチュエータ）は、姿勢の変化を補償する羽ばたき方をする必要がある。さらに、姿勢の変化により流体の挙動も変化する。そのため、羽の駆動態様そのものを変更する必要がある場合も考えられる。このため、浮上の不安定性が増し、飛行態様が複雑になってしまうという問題が生じる。

【0015】

前述の問題を解決するには、羽ばたきに運動に伴って生じる羽駆動部の姿勢の変化を正確に検知するとともに、羽駆動部の姿勢の変化に応じた新たな羽の駆動態様を算出できる高速な情報処理を行なうことが可能な制御部が必要となる。

【0016】

3：剛体を実現するために生じる質量やコストの増大

また、実際に前述した問題に伴う悪影響を容認して、羽ばたき飛行ロボットを作成したとしても、変形の小さい羽を作るために、羽を厚くするか、または、羽に剛性の非常に大きな材料を用いる等の工夫が必要となる。そのため、羽の質量が大きくなるか、または、羽の製造コストが高くなる、という新たな問題が生じる。

【0017】

また、逆に、羽が柔らか過ぎる場合には、以下のような問題が生じる

1：迎え角減少による揚力の低下

羽が柔らかすぎると、流れてくる流体を過度に多量に受け流してしまい、羽に及ぼされる揚力が低下してしまう。

【0018】

2：回転揚力を発生させる際の効率低下

回転揚力を発生させるためには、並進運動と回転運動との和によって生じる羽

の上側を流れる流体の絶対流速と羽の下側を流れる流体の絶対流速とに、差があることが必要である。しかしながら、受動変形する羽は流体に沿って移動するため、羽が柔らかすぎるとこの絶対流速の差が小さくなる。そのため、羽の回転揚力が低下してしまう。

【 0 0 1 9 】

3 : 後流捕獲におけるタイミングのずれ

後流捕獲は、羽の並進運動方向が反転することによって行われる。そのため、羽の剛性が過度に小さい場合には、変形による時間的な運動の遅れに起因して、後流捕獲のタイミングがずれる場合がある。そのため、羽の後流捕獲の効率が低下する。

【 0 0 2 0 】

上述した事項から次のようなことが導かれる。

羽の剛性には最適値が存在する。そのため、従来のように羽を剛体であると仮定するのではなく、羽は変形するものとして、羽の運動態様の解析を行なう必要がある。変形する羽を用いて解析を行なうためには、妥当な羽の剛性を見積もる手法が必要になる。しかしながら、上記のM.Dickinsonらの力学的等価モデルでは、羽の変形を等価にすることは困難である。

【 0 0 2 1 】

彼らは、レイノルズ数が等しければ流体の挙動は相似であるという原理を用いている。しかしながら、羽のような構造物の支配則と流体の支配側とは異なり、前述の原理は、羽のような構造物においては成立しない。

【 0 0 2 2 】

たとえば、トタン板のような波板について考える。波板の形状を四辺形と仮定する。波板の山または谷が延びる方向に垂直な断面を固定し、すなわち、波板をその波板の山または谷が延びる方向に平行な方向に延びる片持ち梁と仮定する。その仮定された波板の片持ち梁の自由端を構成する1辺に垂直荷重を負荷した際の、垂直荷重に対する波板の自由端の変位量は、波板の厚みに反比例する。

【 0 0 2 3 】

ところが、波板の山や谷が延びる方向に平行な断面を固定し、すなわち、波板

をその波板の山または谷が延びる方向に垂直な方向に延びる片持ち梁と仮定する。その仮定された波板の片持ち梁の自由端を構成する 1 辺に垂直荷重を負荷した際の、垂直荷重に対する波板の自由端の変位量は、波板の厚みの 3 乗に反比例する。

【 0 0 2 4 】

すなわち、波板のような単純な形状の構造物ですら、拡大・縮小によって剛性は変化してしまう。したがって、拡大模型の製造に際して、所定の変形を基準に、実際の昆虫と相似の流体の挙動に対して相似の変形をする羽の拡大模型を製造したとしても、所定の変形の度合いとその所定の変形とは異なる方向の変形の度合いとは全く異なってしまう。

【 0 0 2 5 】

また、逆に、拡大模型を用いないのであれば、数十 Hz 以上という高い羽の周波数において、mm オーダーより小さい流体の流れの挙動を計測する必要がある。しかしながら、mm オーダーより小さい流体の流れの挙動を計測することが可能な計測技術は存在しない。

【 0 0 2 6 】

また、航空機の設計を前提とする数値計算の分野においても、剛体の羽を扱うことが前提となっており、羽の変形を扱える計算手法はこれまで存在しなかった。

【 0 0 2 7 】

以上より、従来の研究における成果を用いるために前提となる硬い羽は、柔らかい羽に比べて羽ばたき飛行における特性が悪く、適さなかった。

【 0 0 2 8 】

また、柔らかい羽を設計するための手法も存在しなかったため、実質上、有効な柔らかさの羽を製造することが不可能であった。

【 0 0 2 9 】

本発明は、従来の技術または従来の手法における上記の問題点を解決するためになされたものであり、その目的は、羽ばたき飛行に適した剛性の羽を有する浮上移動装置およびその製造方法を提供することである。

【 0 0 3 0 】

【課題を解決する手段】

本発明の羽ばたき浮上移動装置は、本体が停空飛翔可能かつ移動可能な程度において、周囲の流体から受ける力により弾性変形する羽部と、羽部を駆動する駆動部と、駆動部の駆動態様を制御する制御部とを備えている。

【 0 0 3 1 】

上記の構成によれば、剛体の羽部の欠点である羽ばたき運動の非効率性および羽ばたき運動の制御の不安定性を改善することができる。

【 0 0 3 2 】

前述の羽部は、流体の上流側のねじり剛性または曲げ剛性が、流体の下流側のねじり剛性または曲げ剛性よりも高いことが望ましい。

【 0 0 3 3 】

この構成によれば、羽部の流体の上流側に圧縮方向の流体力が作用して羽部の流体の上流側が座屈すること抑制することができる。

【 0 0 3 4 】

また、羽部は、羽部の前縁側のねじり剛性または曲げ剛性が、羽部の後縁側のねじり剛性または曲げ剛性よりも高いことが望ましい。

【 0 0 3 5 】

この構成によれば、羽部の前縁側に圧縮方向の流体力が作用して羽部の前縁側が座屈すること抑制することができる。

【 0 0 3 6 】

また、羽部の流体の上流側には、羽部の翼幅方向に沿って稜線または谷線が延びる波板構造が設けられていてもよい。また、羽部の前縁側には、羽部の翼幅方向に沿って稜線または谷線が延びる波板構造が設けられていてもよい。また、羽部は、流体の上流側の厚みが流体の下流側の厚みに比較して厚いものであってもよい。また、羽部を支持する支持構造は、流体の上流側の太さが流体の下流側の太さに比較して太いものであってもよい。また、羽部は、羽部の前縁側の厚みが、羽部の後縁側の厚みに比較して厚いものであってもよい。また、羽部を支持する支持構造は、羽部の前縁側の太さが羽部の後縁側の太さに比較して太いもので

あってもよい。

【 0 0 3 7 】

前述のように構成すれば、羽部の質量を大幅に増加させることなく、前述の羽部の流体の上流側または羽部の前縁側の座屈を抑制することが可能な羽の剛性の分布を実現することができる。

【 0 0 3 8 】

また、羽部は、流体の流速が相対的に大きい部位においては、流体の流速が相対的に小さい部位に比較して、迎え角が小さいことが望ましい。また、羽部は、羽部の付根部側に比較して、羽部の先端部側の迎え角が大きいことが望ましい。

【 0 0 3 9 】

この構成によれば、羽部に衝突する流体の流速の小さい部位では揚力を高めることができるとともに、羽部に衝突する流体の流速の大きい部位では失速を防ぐことができる。

【 0 0 4 0 】

また、羽部は、所定の回転中心点回りに回転が可能であり、羽部の回転中心点に相対的に近い側の部位の曲げ剛性が、回転中心点に相対的に遠い側の曲げ剛性に比較して高いことが望ましい。

【 0 0 4 1 】

前述の構成によれば、羽ばたき浮上移動装置の旋回において、羽の部位のうち回転半径の小さい部位、すなわち運動速度の小さい回転中心点側の運動を、羽の部位のうち回転半径の大きい部位、すなわち運動速度の大きい回転中心点よりも羽先端側に近い部分の運動に比較して、機敏にすることができる。

【 0 0 4 2 】

また、羽部は、所定の回転中心点回りに回転が可能であり、羽部の回転中心点に相対的に近い側の部位のねじり剛性が、回転中心点に相対的に遠い側のねじり剛性に比較して高いことが望ましい。

【 0 0 4 3 】

前述の構成によれば、羽部の部位のうち羽部に衝突する流体の流速の大きい部位はより迎え角が小さくなるため、流速に対応した迎え角となる羽部にすること

ができる。

【0044】

また、羽部は、回転中心点に近い側の厚みが回転中心点に遠い側の厚みに比較して厚いことが望ましい。また、羽部を支持する支持構造は、回転中心点に近い側の太さが回転中心点に遠い側の太さに比較して太いことが望ましい。

【0045】

この構成によれば、羽部の回転中心点に近い側と羽部の回転中心点に遠い側の剛性の違いをより単純な手法により実現することができる。

【0046】

また、羽部は、羽部の前縁と羽部の後縁とに沿って延びる回転軸が、羽部の前縁と羽部の後縁との間のほぼ中央部に位置するように設けられていることが望ましい。

【0047】

このような構成によれば、羽部の前縁と羽部の後縁とに沿って延びる回転軸が、前縁側および後縁側のうちのいずれか一方に偏った場合よりも、羽部の上下に発生する圧力の差を大きくすることができる。

【0048】

また、制御部は、羽部の羽ばたき運動の両端死点における羽部の切り返しの動作の際に、切り返し直前の羽部の羽ばたき運動により発生した渦の上方に羽部の下面が接触するように、駆動部を制御することが望ましい。

【0049】

この構成によれば、羽部の切り返しの際の浮上力の低下を補うことができるとともに、羽部の変形の反転を行うことができる。

【0050】

また、制御部は、羽部の切り返しの際に、切り返しにより発生する渦の回転中心軸が延びる方向と羽部の曲率中心軸が延びる方向とが一致するような弾性変形をするように、駆動部を制御することが望ましい。

【0051】

この構成によれば、羽部の羽ばたき運動によって羽部に生じる下向きの力を極

力小さくすることができるため、羽ばたき浮上移動装置の浮上力の低下を極力抑制することができる。

【0052】

また、羽部は、駆動部により駆動されたとき、羽部の部位によって弾性変形に位相差があることが望ましい。

【0053】

この構成によれば、羽部の部位によって発生する浮上力等のピークのタイミングが異なるため、羽部に急激な加速度が生じることを抑制することができる。

【0054】

また、羽部は、羽部の相対的に大きな流体力が及ぼされる部位の位相が、羽部の相対的に小さな流体力が及ぼされる部位の位相に比較して遅れた位相遅れを有するように、弾性変形することが望ましい。また、羽部は、羽部の先端部の位相が、羽部の付根部の位相に比較して遅れた位相遅れを有するように、弾性変形することが望ましい。

【0055】

この構成によれば、羽部の各部位それぞれに衝突する流体が羽部に及ぼす力が相違することによって生じる、羽部の各部位の加速度の相違を小さくすることができる。

【0056】

また、前述の位相遅れは、羽ばたき運動の1周期の $1/2$ 以下であることが望ましい。このようにすることにより、羽部は羽ばたき周期の $1/2$ で羽ばたき運動の方向が反転するため、前述の位相遅れを羽ばたき運動の1周期の $1/2$ 以下にすることにより、羽部の先端部にかかる力の位相と羽部の付根部にかかる力の位相とを同じ符号の位相に維持することができる。

【0057】

また、制御部が駆動部を制御する態様と、羽部の弾性変形の態様とは、流体・構造連成解析の結果、羽ばたき浮上移動に関する所定のパラメータが最も優れた値になるように関連付けられていることが望ましい。

【0058】

このように構成することより、羽部の変形の影響が定量化された羽部を有する羽ばたき浮上移動装置となる。

【 0 0 5 9 】

また、羽ばたき浮上移動に関する所定のパラメータが、羽部の羽ばたき運動によって生じる浮上力であってもよい。

【 0 0 6 0 】

この構成によれば、羽ばたき運動により、最大の浮上力を生じさせることができる羽部を有する浮上移動装置となる。

【 0 0 6 1 】

また、前述の羽ばたき浮上移動に関する所定のパラメータが、羽部の羽ばたき運動によって生じる浮上力を、その浮上力を生じさせるときの羽部の駆動に必要なトルクで除算した値であってもよい。

【 0 0 6 2 】

このように構成することにより、1トルク当りの浮上力が最も大きな浮上移動装置となる。すなわち、同一浮上力を生じさせるためのトルクが最も小さい駆動部を用いることができる。そのため、浮上により有利になる羽ばたき浮上移動装置となる。なお、本発明においては、トルクとは、特に断らない限り、羽部の駆動に用いられる回転力の強度を指す。

【 0 0 6 3 】

また、前述の羽ばたき浮上移動に関する所定のパラメータが、羽部の羽ばたき運動によって生じる浮上力を、その浮上力を生じさせるときの羽部の羽ばたきの周波数で除算した値であってもよい。

【 0 0 6 4 】

この構成によれば、駆動周波数の上限が最も小さい駆動部を用いることができる。すなわち、羽部の剛性が低いために、駆動部の駆動周波数を大きくできない場合に、軽量の駆動部を用いることができる。そのため、浮上により有利な羽ばたき浮上移動装置になる。

【 0 0 6 5 】

また、前述の羽ばたき浮上移動に関する所定のパラメータが、羽部の羽ばたき

運動によって生じる浮上力を、その浮上力を生じさせるために必要なエネルギーで除算した値であってもよい。

【0066】

この構成によれば、羽ばたき運動に用いるエネルギーを最も小さくすることができる。そのため、例えば、同一の浮上力を生じさせる場合であっても、よりエネルギー源部が小型化された浮上移動装置にすることが可能になる。

【0067】

なお、本発明においては、羽ばたき運動に用いるエネルギーとは、特に断らない限り、羽部を駆動させる駆動部において消費されたエネルギーである。エネルギーの代表例としては、駆動部の消費電力が挙げられる。

【0068】

また、羽部は、羽部の羽ばたき周波数 f 、羽部の代表長さ L 、剛性が最も高い部位からの距離 r 、剛性が最も高い部位から距離 r の部位にかかる荷重 w 、荷重 w によって生じる変位 d とすると、 $0.36 \times 10^{-8} < r^3 \times w / d / (L \times f)^2 < 4.48 \times 10^{-8}$ の関係が成立するものであることが望ましい。

【0069】

この構成によれば、浮上力の絶対値、トルクに対する浮上力の効率、羽部の駆動エネルギーに対する浮上力の効率を最適値の $1/2$ より劣化させることなく羽ばたくことができる羽部を有する浮上移動装置となる。

【0070】

本発明の浮上移動装置の製造方法は、昆虫の羽の実物の構造に関する物理量を測定する羽構造測定ステップと、羽構造測定ステップにおいて測定された前記羽の実物の構造に関する物理量が数値化され、羽の実物と等価とみなすことができる羽構造等価数値モデルを作成する羽構造等価数値モデル作成ステップとを備えている。

【0071】

また、本発明の浮上移動装置の製造方法は、羽構造等価数値モデルの剛性のパラメータが変更された複数種類の羽構造数値モデルを作成する羽構造数値モデル変更ステップと、昆虫の羽の実物に羽ばたき運動をさせて、羽ばたき運動の態様

に関する物理量を測定する羽ばたき運動態様測定ステップと、羽ばたき運動の態様に関する物理量が数値化された羽ばたき運動数値モデルを作成する羽ばたき運動数値モデル作成ステップとを備えている。

【 0 0 7 2 】

また、本発明の浮上移動装置の製造方法は、予め設定された解析のための仮想流体内において、複数種類の羽構造数値モデルそれぞれに、羽ばたき運動数値モデルで表わされる羽ばたき運動を行なわせた際の、仮想流体の流体に関する数値モデルおよび羽構造数値モデルの構造に関する数値モデルそれぞれを、流体の挙動と構造物の挙動との相互作用を含めて数値モデル化する流体・構造連成解析を行なうことにより算出する流体・構造連成解析ステップを備えている。

【 0 0 7 3 】

本発明の浮上移動装置の製造方法は、複数種類の羽構造数値モデルのうち、流体・構造連成解析ステップにより得られた仮想流体の流体に関する数値モデルおよび羽構造数値モデルの構造に関する数値モデルそれぞれのうちの所定のパラメータの値が最も優れた値である羽構造数値モデルを用いて、駆動装置により駆動される羽部を製造する羽部製造ステップを備えている。

【 0 0 7 4 】

前述の製法によれば、変形の影響を定量化された羽部を有する浮上移動装置を製造することができる。

【 0 0 7 5 】

本発明の浮上移動装置の製造方法は、所定のパラメータが、羽構造数値モデルを羽ばたき運動させたときに羽部に生じる浮上力であってもよい。

【 0 0 7 6 】

この製法によれば、羽ばたき運動により、最大の浮上力を生じさせることができる羽部を有する浮上移動装置を製造することができる。

【 0 0 7 7 】

本発明の浮上移動装置は、所定のパラメータが、羽構造数値モデルを羽ばたき運動させたときに羽部に生じる浮上力を、その浮上力を生じさせるときに羽部の駆動に必要なトルクで除算した値であってもよい。

【0078】

この製法によれば、羽ばたき運動に用いるエネルギーを最も小さくすることができる羽部を製造することができる。そのため、例えば、同一の浮上力を生じさせる場合であっても、よりエネルギー源部が小型化された浮上移動装置を製造することが可能になる。

【0079】

なお、本発明においては、羽ばたき運動に用いるエネルギーとは、特に断らない限り、羽部を駆動させる駆動部において消費されたエネルギーである。エネルギーの代表例としては、駆動部の消費電力が挙げられる。

【0080】

また、前述の所定のパラメータが、羽構造数値モデルを羽ばたき運動させたときに羽部に生じる浮上力を、浮上力を生じさせるときの羽部の羽ばたき運動の周波数で除算した値であってもよい。

【0081】

この製法によれば、駆動周波数の上限が最も小さい駆動部を用いることができる。したがって、剛性が低いため駆動周波数を大きくできない、軽量の駆動部を用いることができる。そのため、浮上により有利な羽ばたき浮上移動装置を製造することが可能になる。

【0082】

また、所定のパラメータが、羽構造数値モデルを羽ばたき運動させたときに羽部に生じる浮上力を、その浮上力を生じさせるために必要なエネルギーで除算した値であってもよい。

【0083】

この製法によれば、浮上力の絶対値、トルクに対する浮上力の効率、および羽部の駆動エネルギーに対する浮上力の効率を最適値の $1/2$ より劣化させることなく羽ばたきことができる浮上移動装置を製造することができる。

【0084】

【発明の実施の形態】

(実施の形態1)

本発明の実施の形態 1 の浮上移動装置としての羽ばたき飛行移動装置について、図 1 ～ 1 4 を用いて説明する。

【0085】

なお、本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置としては、様々な羽の駆動態様（羽ばたき方）その駆動態様を実現する駆動部、制御部およびその他付加的な構成要素を想定することが可能である。

【0086】

しかしながら、駆動態様を実現する構成要素自体は、本発明の本質ではない。たとえば、アクチュエータの特性等を勘案し、本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置に採用する羽ばたき方と異なる羽ばたき方を採用した際にも、本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置に示す手法と同様の手法によって最適な羽ばたき飛行ロボットを作成することが可能である。

【0087】

したがって、本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置については、目的とする羽ばたき態様を停空飛翔に絞って説明する。また、羽の駆動部をブラックボックスとして説明する。さらに、羽の駆動を、後述する図 3 および図 4 に示される羽ばたき方に絞って説明する。

【0088】

（全体の構成）

本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置の作成方法の流れを図 1 に示す。本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置の概略構成を図 2 に示す。

【0089】

まず、図 1 を用いて、本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置 9 0 の製造方法の概略を説明する。

【0090】

本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置 9 0 の製造方法においては、まず、羽 9 0 4 の実構造等価モデルとしての羽モデル 2 を作成する。実構造等価モデルの作成手順の詳細については後述する。次に、羽モデル 2 の剛性のパラメータの変更を行う。それにより、剛性 1、剛性 2・・・剛性 n までの n 種類の剛性を有する

羽構造数値モデルが作成される。

【0091】

また、昆虫の羽の挙動の観察結果に基づいて、羽部を駆動する羽駆動部905の駆動態様を数値化することにより羽ばたき方モデル（羽ばたき態様数値モデル）を作成する。羽ばたき方モデルの作成方法の詳細については後述する。

【0092】

次に、前述のn種類の羽構造モデルそれぞれを前述の羽ばたき方モデルで羽ばたかせたときの流体の挙動と構造の挙動とを含めて解析する流体・構造連成解析を行う。その結果、流体の挙動に関する物理量および構造の挙動に関する物理量のデータ1、データ2・・・データnが算出される。

【0093】

そのデータ1、データ2・・・データnのうち、浮上力等の所定のパラメータが最適値であるデータを抽出する。最後に、その抽出されたデータを導くための羽構造数値モデルの各パラメータの値となる羽部の実物を作成する。駆動部905は、羽部の実物を、前述の羽ばたきモデルにより表現される羽ばたき態様で駆動する。それにより、所定のパラメータが最も優れた数値になる、羽の剛性および羽の羽ばたき方モデルの組合せが実現されることになる。

【0094】

なお、所定のパラメータとして、浮上力、単位トルク当りの浮上力、単位周波数当りの浮上力、または単位エネルギー当りの浮上力が考えられる。

【0095】

本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置90の構成とその機能を、図2～図4を用いて説明する。本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置は、胴体906に、制御部901、指示受信部902、センサー部903、および駆動部905が内装されている。また、駆動部905に羽904が回動可能に接続されている。また、羽904は駆動部905の駆動により羽ばたき運動を行う。

【0096】

指示受信部902において移動指示情報が受信される。センサー部903において羽ばたき飛行移動装置90の姿勢および位置などの飛行状態情報が検出され

る。制御部 9 0 5 は、移動指示情報および飛行状態情報に基づいて、羽 9 0 4 の羽ばたき態様を決定するとともに、駆動部 9 0 5 に羽 9 0 4 の羽ばたき態様を特定可能な駆動信号を送信する。それにより、羽 9 0 4 が所定の羽ばたき態様で運動を開始する。羽 9 0 4 は、その運動により、周囲の空気から反作用の力を受ける。この反作用の力が駆動部 9 0 5 に伝達される。その結果、反作用の力が羽ばたき飛行ロボット 9 0 の自重よりも大きくなった場合に、駆動部 9 0 5 が固定された胴体 9 0 5 が浮上する。

【 0 0 9 7 】

定常的なホバリングの際には、羽 9 0 4 における図 5 に示す点 P 1 および点 P 2 が、それぞれ図 3 および図 4 に示す座標値の時系列の変化と同じ変化を行うように、駆動部 9 0 5 は、羽 9 0 5 を駆動する。なお、図 5 に示す点 P 1 および点 P 2 においては、回転は拘束されていない。また、図 5 に示す点 P 0 は、駆動部 9 0 5 に回動可能に接続されている。以下、羽ばたき飛行装置の定常的なホバリングについてのみ説明する。

【 0 0 9 8 】

(数値モデル作成)

次に、流体・構造連成解析によって、羽ばたき飛行の数値モデルを作成する手法について、図 3 ～ 1 1 を用いて説明する。

【 0 0 9 9 】

本発明者らが用いた解析手法は、張 群(1999年度東京大学学位論文)により示された A L E 有限要素法解析を利用した流体・構造の強連成解析方法である。

【 0 1 0 0 】

以下、流体・構造の強連成解析方法を用いて、羽の構造の挙動と羽の駆動による周囲流体の挙動とを解析する手法を具体的に述べる。

【 0 1 0 1 】

まず、羽構造数値モデルを羽ばたき運動させる空間を設定する必要がある。本発明者らの計算によると、羽の長さ 4 c m、羽ばたき周波数 3 0 H z の羽ばたき飛行移動装置について解析する場合、羽ばたき飛行移動装置から概ね 2 0 c m 以遠においては空気の流れはほぼ定常流となることが判明している。そのため、羽

構造数値モデルを羽ばたき運動させる空間としては、半径 2 0 c m の球体内の空間を設定する。したがって、半径 2 0 c m の球体内の空間のみが流体・構造の強連成解析の対象となる。それにより、流体・構造の強連成解析における計算量を減らすことができる。

【0 1 0 2】

なお、本実施の形態の流体・構造連成解析においては、説明の簡便のため、1 辺 2 0 c m の立方体の解析領域の略中央に羽ばたき飛行移動装置 9 0 が位置していることを前提条件として、停空飛行、すなわちホバリングを行っている際の流体に関する数値モデルおよび構造に関する数値モデルを作成するものとする。

【0 1 0 3】

本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置 9 0 において用いた流体・構造連成解析手法においては、物理的要素を空間的に離散化して扱う。そのため、羽の構造の物理的要素を基本形状と呼ばれる形状に分割する必要がある。

【0 1 0 4】

基本形状としては、以下に説明する羽モデル 2 においては四辺形を、流体モデルにおいては六面体を用いた。

【0 1 0 5】

なお、流体・構造連成解析においては、基本形状を要素と呼び、各要素における頂点をはじめとする代表点を節点と呼ぶ。また、各要素および各節点それぞれには、各要素および各節点それぞれを識別するために、重複することのない番号が各要素および各節点それぞれに与えられている。これらの番号それぞれを、各々要素番号および節点番号と呼ぶ。さらに、各要素番号に対応して設定されている節点番号の列をコネクティビティと呼ぶ。

【0 1 0 6】

A L E 有限要素法においては、以下のパラメータを、流体および構造の両者において、全ての要素または節点に設定する必要がある。

【0 1 0 7】

すなわち、各節点の座標、各節点のコネクティビティ、各節点の境界条件、および、各要素の物性値それぞれを決定することが、流体の数値モデルおよび構造

の数値モデルを作成することと等価である。

【0108】

（羽の構造に関する数値モデルの作成）

まず、羽904を基本形状に分割する。本発明者らが用いた羽904を基本形状に分割した様子を、要素の厚みを示すハッチングとともに、図5に示す。なお、羽904を基本形状に分割する手法は、一般的なメッシュ作成ソフト等を用いた手法である。

【0109】

各節点の座標および各節点のコネクティビティについては、図5に示される各要素と節点とにそれぞれ要素番号と節点番号とを与えることで作成される。

【0110】

また、各節点の境界条件については、羽を駆動する駆動態様を境界条件として与える。羽の駆動態様は、羽の各要素または節点の位置および姿勢である。本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置90では、駆動装置905より能動的に運動が与えられるのは羽904の付根部のみである。そのため、羽904の付根部の節点の位置および姿勢または羽904の付根部の節点の位置および姿勢に相当する値を与えることで、羽を駆動する駆動態様が作成される。

【0111】

各要素の物性値は、予め分かっているデータであり、様々な与え方があるので、本実施の形態の流体・構造連成解析で採用した方法について後述する。

【0112】

（流体に関する数値モデルの作成）

流体要素にはメッシュが用意されていないので、例えば市販のメッシュ作成ソフトなどが用いられて作成される。

【0113】

本発明者らが用いた流体・構造連成解析手法においては、流体のメッシュと構造のメッシュとは、共通のノードを有する必要がある。そのため、まず、羽904を含む4辺形のメッシュを作成する。次に、4辺形のメッシュを上下に掃引することによって、6面体メッシュを作成する。また、羽904以外の4辺形メッ

シュについては、前述の 6 面体メッシュが作成された後で削除される。その結果、図 6 および図 7 に示すようなメッシュが作成される。

【0 1 1 4】

これにより、流体要素についても各節点の座標およびコネクティビティが作成される。

【0 1 1 5】

また、流体と羽とが共有する節点には、境界条件として、固着境界条件が付与される。また、立方体の解析領域の外壁を構成する節点については、圧力 0、即ち自由に流体が行き来できる境界条件が付与される。

【0 1 1 6】

また、各流体要素の物性値としては、空気の質量密度、粘性係数、および体積弾性率が与えられる。

【0 1 1 7】

そして、定常的にホバリングしている状態に収束した構造に関する数値モデルおよび流体に関する数値モデルを算出するために、羽の構造に関する数値モデルの 1 周期の羽ばたき運動を、複数回反復して行う状態が、流体・構造連成解析される。

【0 1 1 8】

(実際のデータ)

本実施の形態の流体・構造連成解析で実際に用いたデータを、表 1 ～ 6 を用いて説明する。

【0 1 1 9】

各節点の座標については、流体に関する数値モデルと構造に関する数値モデルとの双方に共通である。したがって、各節点の座標は、表 1 に示すように、各ノードに番号を振って Node1、Node2・・・とし、各ノードの x、y、z 座標とともに列記したものとなる。なお、表 1 は、NodeCoords.dat と名付けられている。

【0 1 2 0】

続いて、羽の構造を指定するため、羽の構造に関する数値モデルを構成するノードのコネクティビティを指定する必要がある。そのため、図 8 に示される要素

1 について、左下角の点から反時計回りに、Node71(すなわちP0)、Node83(すなわちP1)、Node142、Node337(すなわちP2)、と指定することで、4節点シェル要素が表現される。すなわち、表 2 に示すように、コネクティビティは、羽の構造に関する数値モデルを構成する各シェルに番号を振って、ShellElement1、ShellElement2、・・・とし、各シェルを構成するノード番号を、先に説明した順に列記したものとなる。なお、表 2 は、ShellMesh.dat と名付けられている。

【 0 1 2 1 】

同様に、流体領域に作成したメッシュについても、コネクティビティを指定する。ただし、流体領域は 6 面体要素で表されている。更に、圧力というスカラー量を表現するため、各流体のメッシュについて、さらに 1 点、圧力節点と呼ばれる節点が付加される。コネクティビティを指定する順は、6 面体要素下面の 4 点を反時計回りに、続いて上面の 4 点を同じく反時計回りに、最後に圧力節点を、それぞれノード番号を列記する。それにより、合計 9 点のコネクティビティの集合が、表 3 のように表される。表 3 においては、合計 9 点のコネクティビティの集合が示されている。なお、表 3 は、FluidMesh.dat と名付けられている。

【 0 1 2 2 】

また、流体および構造それぞれに物性値を付与する必要がある。表 4 は、構造に関する数値モデルの各要素の物性値が示されたものである。また、表 5 は、流体の各要素の物性値が示されたものがある。表 4 および表 5 は、それぞれ、ShellMaterial.dat および FluidMaterial.dat と名付けられている。ShellMaterial.dat においては、羽の各構造に関する数値モデルの要素について、ヤング率、ポアソン比、比重、および厚みが列記されている。また、FluidMaterial.dat においては、各流体要素について、粘性、比重、および体積弾性率が列記されている。

【 0 1 2 3 】

本実施の形態においては複数種類の異なる剛性の羽の構造に関する数値モデルについて、流体・構造連成解析を行う。このとき、上述のShellMaterial.dat に記されたヤング率を変更する。それにより、羽の構造に関する数値モデルの剛性の変更が行われる。より具体的には、羽 9 0 4 を構成する材料の全体の剛性が均一であるものとして、羽 9 0 4 を構成する材料の変更を行うことによりヤング率

を変更する。

【 0 1 2 4 】

また、表 6 には、ShellMotion.dat において、羽 9 0 4 の節点における x、y、z 座標の時刻歴、すなわち、羽 9 0 4 の節点の位置の変化が示されている。

【 0 1 2 5 】

前述の通り、羽 9 0 4 の羽ばたき態様は、羽 9 0 4 の根元の節点の位置および姿勢の 6 自由度で表現される。本実施の形態の流体・構造連成解析においては、データ処理の都合上、羽 9 0 4 の羽ばたき態様を、羽 9 0 4 の付根部の要素を構成する 3 点の位置で表現するものとする。

【 0 1 2 6 】

なお、この要素の変形は非常に小さいものとして、3 点の自由度は合計で 9 自由度である。また、3 点間の距離がそれぞれ一定である 3 つの拘束条件が与えられる。そのため、9 自由度から 3 自由度を差し引いた 6 自由度で羽の付根部の位置と姿勢を表すことができる。また、表 6 のデータは、図 3 および図 4 に示す座標値の時刻歴そのものである。

【 0 1 2 7 】

なお、以上のデータは一例であり、データ形式およびその数値はこれに限るものではない。

【 0 1 2 8 】

(計算結果)

以下、上記の流体・構造連成解析により得られる流体に関するデータの一例を示す。なお、このデータは、上記表 1 ～ 表 6 に示すデータを用いて流体・構造連成解析を行った結果得られたデータである。

【 0 1 2 9 】

図 9 には、定常状態における羽 2 0 の周囲での流体の挙動を算出した結果が示されている。図 9 においては、矢印が羽 2 0 の周りの絶対流速の分布を表している。なお、計算時間の都合上、図 6 および図 7 に示されるように、羽ばたき浮上移動装置の本体構造が省略され、羽 9 0 4 の片側のみであるハーフモデルを用いて、流体・構造連成解析が行われている。また、表示の煩雑さを避ける都合上、

羽 2 0 に垂直な断面についてのみの絶対流速の分布が表示されている。

【 0 1 3 0 】

また、図 1 0 には、前述の流体・構造連成解析により算出された羽の羽ばたき運動により生じる浮上力が表されている。図 1 0 に示すように、浮上力は、最初不規則であるが、最終的には周期的な挙動に収束している。浮上力が周期的になった時点で流体の挙動および構造の挙動それぞれは、周期的な挙動となっている。この浮上力の周期的な挙動は、ホバリング時の流体の挙動および構造の挙動と等価である。

【 0 1 3 1 】

また、図 1 1 には、前述の流体・構造連成解析において、羽 9 0 4 の駆動に必要な駆動トルクと時間との関係が示されている。なお、 $\theta 1$ ($T 1$) は羽の長手方向（前縁または後縁が延びる方向：翼幅方向）、すなわち、胴体中央から外側に向かう方向を回転軸にしたときの右ねじ方向のトルクである。 $\theta 2$ ($T 2$) は羽後方に向かう方向を回転軸にしたときの右ねじ方向のトルクである。 $\theta 3$ ($T 3$) は $\theta 1$ と $\theta 2$ の外積を回転軸にしたときの右ねじ方向のトルクである。

【 0 1 3 2 】

この解析結果から、定常的なホバリングを行うときの構造に関する数値モデルおよび流体に関する数値モデルを作成することができる。その結果、羽ばたき移動飛行装置が前述の羽ばたき態様に関する数値モデルにより浮上可能な重量および前述の羽ばたき態様の数値モデルの羽ばたき態様を実現するためのアクチュエータのトルクを求めることができる。

【 0 1 3 3 】

（羽作成）

続いて、羽 9 0 4 の作成方法について、図 1 2 ～図 1 4 を用いて説明する。

【 0 1 3 4 】

図 1 2 には、前述の構造に関する数値モデルにおける羽のヤング率と、対数的に羽のヤング率を変化させた際の浮上力との関係が示されている。浮上力を基準にしてヤング率の変化を図示した図 1 2 から分かるように、羽のヤング率は 1.0×10^9 付近が最適である。また、羽のヤング率が 2.5×10^8 以下の値では

、浮上力が最大値の 0.5 倍以下となっている。そのため、ヤング率が 2.5×10^8 以下の値の羽は、羽ばたき飛行移動装置には適していないと言える。

【0135】

また、図 13 には、羽の駆動トルクの最大振幅を求め、前述の浮上力を羽のトルクの最大振幅の値で除算した値とヤング率との関係が示されている。つまり、駆動トルクの効率とヤング率との関係が表されている。図 13 から分かるように、羽のヤング率は 7.07×10^8 付近が最適であり、羽のヤング率が $1.77 \times 10^8 \sim 5.66 \times 10^9$ 以外の範囲では、同じトルクでも得られる浮上力が最大値の半分以下になってしまう。そのため、ヤング率が $1.77 \times 10^8 \sim 5.66 \times 10^9$ 以外の範囲の羽は、羽ばたき飛行移動装置には適していないと言える。

【0136】

さらに、駆動部 905 の駆動特性とヤング率との関係とを導くことも有効である。一例として、電氣的引力を生じさせるアクチュエータのように、駆動力が電圧に比例するアクチュエータを羽ばたき飛行移動装置のアクチュエータとして想定する。一般に、アクチュエータのエネルギーはアクチュエータに印加される電圧の二乗に比例する。そのため、羽ばたき飛行に必要なエネルギーは、羽ばたき運動時に駆動部に付与される力の二乗に比例する。このような特性を用いた計算により、駆動部 905 が消費するエネルギーを算出することができる。それにより、図 14 に示すように、浮上力をエネルギーで除算した単位エネルギーあたりの浮上力とヤング率との関係を導き出すことができる。

【0137】

図 14 から分かるように、羽のヤング率は 5.0×10^8 が最適であり、羽のヤング率が $1.77 \times 10^8 \sim 2.0 \times 10^9$ 以外の範囲では、同じ浮上力を得るにも最適値の 2 倍以上も余分な駆動エネルギーが必要となる。このため、羽のヤング率が $1.77 \times 10^8 \sim 2.0 \times 10^9$ 以外の範囲では、駆動エネルギー源の質量を大きくする必要が生じるため、羽ばたき飛行移動装置の羽には適さなくなる。

【0138】

その他の羽の作成方法としては、次に示すような羽の作成方法がある。

まず、図 1 1 のトルクの時刻歴のデータを用いて、駆動部 9 0 5 に要求される駆動周波数をグラフに表す。次に、そのグラフからアクチュエータの駆動の 1 周波数あたりの浮上力とヤング率との関係をグラフ化する。その結果、そのグラフを用いて、1 周波数あたりの浮上力が最適なヤング率を見つけ出す。そのヤング率を有する羽を作成する。

【 0 1 3 9 】

また、羽ばたき飛行移動装置 9 0 のアプリケーション、すなわち、浮上態様、使用状態または飛行態様の数値モデルそれぞれとヤング率との関係をグラフ化する。それにより、浮上態様、使用状態または飛行態様が目標とする浮上態様、使用状態または飛行態様に一番近いヤング率の羽を用いて、羽ばたき飛行移動装置を作成してもよい。たとえば、目標とする浮上態様、使用状態または飛行態様としては、浮上力の絶対値または胴体 9 0 6 に及ぼされる振動の大小等が考えられる。

【 0 1 4 0 】

以上、本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置においては、剛性の異なる複数種類の羽構造数値モデルそれぞれに対して、流体・構造連成解析の結果得られた流体の挙動に関する数値モデルに基づいて、所定のパラメータについて最適な結果が得られるヤング率を有する羽構造数値モデルと等価な羽の実物を作成する。

【 0 1 4 1 】

ただし、本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置の設計においては、浮上力、駆動トルク効率および駆動エネルギー効率のそれぞれとも、最適値の 0. 5 倍の値を基準値とした。しかしながら、この基準値は、説明のための一例であり、この値に限定されるものではない。なお、この基準値のもとでは、羽のヤング率は、 $2.5 \times 10^8 \sim 2.0 \times 10^9$ が適していると判断される。

【 0 1 4 2 】

最も単純には、ヤング率が $2.5 \times 10^8 \sim 2.0 \times 10^9$ となる材料を用いて羽 9 0 4 を作成すれば、駆動部 9 0 5 に適した羽 9 0 4 を容易に作成することができる。

【0143】

また、羽の材料として予め用意したヤング率の材料しか用いることができない場合には、この最適な羽904の構造に関する数値モデルと同様の変形をするように、羽の厚さ分布を変更することにより、目的とする剛性分布を有する羽を作成してもよい。

【0144】

一般に、曲げ変形が主な部分については、羽の曲げ変形の度合いは、羽の厚さの3乗とヤング率との積に反比例する。また、引っ張り変形が主な部分については、羽の引っ張り変形の度合いは、羽の厚さとヤング率との積に比例する。そのため、羽構造数値モデルの厚さ分布を再構成することにより、羽を作成する手法が考えられる。

【0145】

より現実的には、次に示すような手法が考えられる。まず、羽構造数値モデルの厚み分布を求める。次に、流体・連成構造解析の結果を用いて、羽構造数値モデルの各部位の荷重に対する変位量および変形量を求める。最後に、前述の最適な羽構造数値モデルに荷重を付与したときに生じる変形と同じ変形が生じるように、二分探索や感度解析などによって、前述の羽構造数値モデルの羽の厚み分布を修正する。この修正により得られた新たな羽構造数値モデルに基づいた厚み分布を有する羽部の実物を作成する。

【0146】

なお、前述のように、羽構造数値モデルは、厚みの変更に対して、曲げ剛性と引っ張り強さが別々の変化をするので、厚みの変更は最小限であることが望ましい。

【0147】

以上の手法により、最適な剛性を有する羽904が作成される。
前述の解析の結果の考察から分かるように、駆動部905に対して最適な羽は、剛体の羽ではなく、ヤング率が $2.5 \times 10^8 \sim 2.0 \times 10^9$ の範囲にある弾性変形可能な羽である。

【0148】

次に、羽の代表的な部位における剛性を一般化することを考える。

以下においては、本実施の形態の流体・構造連成解析を用いて作成した羽構造数値モデルにおいては、羽の付根部と羽の先端部との間の中央付近の後縁端点（図5におけるP3と称する）における剛性を基準とする。

【0149】

一般に、羽ばたき飛行移動装置が羽ばたき飛行する際、羽に衝突する流体の速度が羽の部位によって異なる。たとえば、羽の先端側は流体の速度が大きく、羽の付根側は流体の速度が小さい。また、流体から羽に与えられる力は羽の速度の二乗に比例する。したがって、羽の先端側から羽の付根側へいくにしたがって、羽の剛性を二乗に比例して大きくすれば、羽の先端から羽の付根までの各部においてほぼ等しい変形が生じることになる。故に、羽の剛性を、羽ばたき周波数と羽の長さの積の二乗に比例するようにすればよい。例えば、羽ばたき周波数が基準となる羽の周波数の2倍、かつ、羽の長さが基準となる羽の長さの1/3倍である場合、羽の剛性は基準となる羽の剛性の4/9倍が妥当な値となる。

【0150】

また、平板の曲げによる変位量は、支点において回転自由度および並進自由度それぞれをとともに拘束した場合、支点との距離の3乗に比例して大きくなる。

【0151】

以上の内容を数式で表すと次のようになる。支点からの距離が r_0 である剛性計測点における荷重-変位関係は、微小荷重 w に対する微小変形 d を用いて、前述のように、 $d/w \propto r^3$ である。したがって、 $K_0 = r_0^3 / (d/w)$ を用いて表される定数 K は、すなわち、支点からの距離 r_0 で規格化された剛性（距離の3乗で除算された剛性）は、支点からの距離 r_0 の大小に関わらず一定である。

【0152】

前述のように、本実施の形態の構造の数値モデル（羽モデル2）における羽の代表長さを L_0 、羽ばたき周波数を f_0 とした場合、代表長さ L および羽ばたき周波数 f の羽における支点からの距離で規格化（除算）された剛性 K は、

$$K = K_0 \times ((L \times f) / (L_0 \times F_0))^2$$

で表されることになる。

【0153】

ここで、変形シミュレーションによって、ヤング率 5.0×10^8 である羽 904 の構造数値モデルについて、 $L_0 = 0.017$ (m) である代表長さにおいて、 $r_0 = 0.00515$ (m) のとき、荷重 9.8×10^{-6} (N) に対する変位量が 1.2×10^{-4} (m) である。本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置においては羽ばたき周波数 $F_0 = 1/0.023$ (Hz) であるため、 $K_0 = 1.12 \times 10^{-8}$ となる。同様に、先に求まっているヤング率の上限値と下限値とを考慮すると、

$$0.66 \times 10^{-8} < K_0 < 3.16 \times 10^{-8}$$

である K_0 が本実施の形態における羽ばたき飛行に最も適した羽の剛性を表す係数である。すなわち、一般的には、

$$0.36 \times 10^{-8} < K / (L \times f)^2 < 4.48 \times 10^{-8}$$

である K を採用して羽の剛性を決定すればよい。

【0154】

また、羽のサイズまたは羽ばたき周波数が前述の羽の構造に関する数値モデルおよび羽ばたき態様の数値モデルの羽ばたき浮上移動装置とは異なる場合には、 K の値に基づいて剛性の範囲を決定し、その決定された剛性を有する羽 904 を作成すればよい。

【0155】

なお、前述の記載内容は、構造に関する数値モデルおよび流体に関する数値モデルから得られたデータの利用手法の一例である。例えば、代表長さ L として、羽の構造に関する数値モデルの部位のうち、羽の支点から最も大きな流体力を受けている部位までの距離を用いてもよい。

【0156】

(補足事項)

なお、本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置においては、羽の構造変形が曲げ変形が主であることを想定して、羽を平板としたが、羽の構造は平板に限定されるものではない。

【 0 1 5 7 】

一般的に昆虫の羽などに見られる、梁および膜の複合構造の構造に関する数値モデルであっても、図 1 に示す手法と同様の手法を用いて、羽の剛性を決定することができる。また、昆虫の羽に見られるような網状の構造は、本実施の形態の羽 9 0 4 のように平板の構造の数値モデルと仮定して、解析を行うことができる。

【 0 1 5 8 】

また、変形する羽の挙動を適正に表現できるものであれば、流体・構造連成解析の手法については本実施の形態の流体・構造連成解析に限るものではない。また、羽の剛性分布に異方性を設けるなどにより、拡大模型を用いても羽の変形を相似的に変更することができるのであれば、実験を行うことによって羽の剛性を決定する手法を用いても、本実施の形態の羽ばたき飛行移動装置を作成することは可能である。

【 0 1 5 9 】

また、本実施の形態の羽構造数値モデルにおいては、説明の簡便のため、羽 9 0 4 全体のヤング率を変更することで羽 9 0 4 の最適な剛性を求めたが、羽の構造（羽の弾性変形の態様）を決定する手法は前述の手法に限定されるものではない。たとえば、羽のヤング率を羽の各部位ごと決定する手法であってもよい。また、羽の厚み分布を羽の各部位ごとに決定する手法であってもよい。さらに、計算量が増えることをいとわなければ、羽 9 0 4 の構造数値モデルの全要素それぞれごとにヤング率および厚みそれぞれを変更して、羽について最適な値のヤング率および厚みの分布を求める手法であってもよい。

【 0 1 6 0 】

なお、羽 9 0 4 の外形および羽 9 0 4 を構成する各要素の形状、周囲の解析空間の設定等も、前述のものに限定されるものではない。また、駆動装置 9 0 5 の特性および駆動態様に応じて、羽の剛性の最適値は変化し得る。そのため、現実的には、たとえば、左右への旋回や前進など、想定される主な駆動態様において、羽の剛性が妥当である範囲を求めるか、または、著しく不適切な剛性にならないように羽 9 0 4 を作成することが望ましい。

【0161】

また、本実施の形態における羽ばたき飛行移動装置90の構成は、外部からの指示上方に基づき自律的に移動するための最低限の抽象化された構成要素として、胴体906に、制御部901、指示受信部902、センサー部903、駆動部905、羽904を用いた。しかしながら、外部からの指示を必要としないならば、指示受信部902は必要ではなく、センサフィードバックを必要としないのならは、センサー部903は必要ではない。

【0162】

また、羽の剛性と羽ばたき方とは密接な関係にあるので、羽の羽ばたき方に基づいて羽の剛性を決定する手法とは逆に、本実施の形態の流体・構造連成解析を用いて算出された浮上力に基づいて、羽ばたき周波数または羽ばたき態様そのものを決定する手法、または、羽の剛性分布の変更と前述の手法とを組み合わせる羽の剛性を決定する手法であってもよい。

【0163】

(本実施の形態の羽ばたき浮上移動装置およびその製造方法の特徴ならびにその効果)

次に、図15～図24を用いて、羽ばたき浮上移動装置およびその製造方法の特徴ならびにその効果を説明する。なお、図15～図17においては、流体の流れが矢印で示されている。

【0164】

本実施の形態の羽ばたき浮上移動装置(90)は、図2に示すように、本体(901, 902, 903, 905, 906)が停空飛翔可能かつ移動可能な程度において、周囲の流体から受ける力により弾性変形する羽部(904)と、羽部(904)を駆動する駆動部(905)と、駆動部(905)の駆動を制御する制御部(901)とを備えている。

【0165】

そのため、剛体の羽部の欠点である羽ばたき運動の非効率性および羽ばたき運動の制御の不安定性を改善することができる。

【0166】

前述の羽部（904）は、図15に示すように、矢印で示す流体の上流側のねじり剛性または曲げ剛性が、矢印で示す流体の下流側のねじり剛性または曲げ剛性よりも高いことが望ましい。

【0167】

この構成によれば、羽部（904）の流体の上流側に圧縮方向の流体力が作用して羽部（904）の流体の上流側が座屈すること抑制することができる。

【0168】

また、羽部（904）は、図15に示すように、羽部（904）の前縁（904a）側のねじり剛性または曲げ剛性が、羽部（904）の後縁（904b）側のねじり剛性または曲げ剛性よりも高いことが望ましい。

【0169】

この構成によれば、羽部（904）の前縁（904a）側に圧縮方向の流体力が作用して羽部（904）の前縁（904a）側が座屈すること抑制することができる。

【0170】

また、羽部（904）の流体の上流側には、図15に示すように、羽部（904）の翼幅方向に沿って稜線または谷線が延びる波板構造（904n）が設けられていてもよい。また、羽部（904）の前縁（904a）側には、羽部（904）の翼幅（w）方向に沿って稜線または谷線が延びる波板構造（904n）が設けられていてもよい。また、羽部（904）は、図16に示すように、矢印で示す流体の上流側の厚み（ t_1 ）が流体の下流側の厚み（ t_2 ）に比較して厚いものであってもよい。また、羽部（904）を支持する支持構造（904s）は、矢印で示す流体の上流側の太さが流体の下流側の太さに比較して太いものであってもよい（複数の支持構造の直径の関係が $d_1 > d_2 > d_3 > d_4 > d_5$ ）。また、羽部（904）は、図16に示すように、羽部（904）の前縁（904a）側の厚み（ t_1 ）が、羽部（904）の後縁（904b）側の厚み（ t_2 ）に比較して厚いものであってもよい。また、図17に示すように、羽部（904）を支持する支持構造（904s）は、羽部（904）の前縁（904a）側の太さが羽部（904）の後縁（904b）側の太さに比較して太いものであってもよい（複

数の支持構造 9 0 4 s の直径の関係が $d_1 > d_2 > d_3 > d_4 > d_5$)。

【 0 1 7 1 】

前述のように構成すれば、羽部 (9 0 4) の質量を大幅に増加させることなく、前述の羽部 (9 0 4) の流体の上流側または羽部 (9 0 4) の前縁 (9 0 4 a) 側の座屈を抑制することが可能な羽部 (9 0 4) の剛性の分布を実現することができる。

【 0 1 7 2 】

また、羽部 (9 0 4) は、図 1 8 に示すように、流体の流速が相対的に大きい部位においては、流体の流速が相対的に小さい部位に比較して、迎え角が小さいことが望ましい ($\alpha < \beta$)。また、図 1 8 に示すように、羽部 (9 0 4) は、羽部 (9 0 4) の付根部 (9 0 4 c) 側に比較して、羽部 (9 0 4) の先端部 (9 0 4 d) 側の迎え角が大きいことが望ましい ($\alpha < \beta$)。

【 0 1 7 3 】

この構成によれば、羽部 (9 0 4) に衝突する流体の流速の小さい部位では揚力を高めることができるとともに、羽部 (9 0 4) に衝突する流体の流速の大きい部位では失速を防ぐことができる。

【 0 1 7 4 】

また、羽部 (9 0 4) は、図 1 9 に示すように、所定の回転中心点 (羽付根部 9 0 4 c) 回りに回転が可能であり、羽部 (9 0 4) の回転中心点 (羽付根部 9 0 4 c) に相対的に近い側の部位の曲げ剛性が、回転中心点 (羽付根部 9 0 4 c) に相対的に遠い側の曲げ剛性に比較して高いことが望ましい。

【 0 1 7 5 】

前述の構成によれば、羽ばたき浮上移動装置 (9 0) の旋回において、羽部 (9 0 4) の部位のうち回転半径の小さい部位、すなわち運動速度の小さい回転中心点 (羽付根部 9 0 4 c) 側の運動を、羽部 (9 0 4) の部位のうち回転半径の大きい部位、すなわち運動速度の大きい回転中心点 (羽付根部 9 0 4 c) から遠い部位の運動に比較して、機敏にすることができる。

【 0 1 7 6 】

また、羽部 (9 0 4) は、図 1 9 に示すように、所定の回転中心点 (羽付根部

9 0 4 c) 回りに回転が可能であり、羽部 (9 0 4) の回転中心点 (羽付根部 9 0 4 c) に相対的に近い側の部位のねじり剛性が、回転中心点 (羽付根部 9 0 4 c) に相対的に遠い側のねじり剛性に比較して高いことが望ましい。

【0 1 7 7】

前述の構成によれば、羽部 (9 0 4) の部位のうち羽部 (9 0 4) に衝突する流体の流速の大きい部位はより迎え角が小さくなるため、流速に対応した迎え角となる羽部 (9 0 4) にすることができる。

【0 1 7 8】

また、羽部 (9 0 4) は、図 2 0 に示すように、回転中心点 (羽付根部 9 0 4 c) に近い側の厚み (t_3) が回転中心点 (羽付根部 9 0 4 c) に遠い側の厚み (t_4) に比較して厚いことが望ましい。また、羽部 (9 0 4) を支持する支持構造 (9 0 4 t) は、図 2 1 に示すように、回転中心点 (羽付根部 9 0 4 c) に近い側の太さが回転中心点 (羽付根部 9 0 4 c) に遠い側の太さに比較して太いことが望ましい (支持構造の直径が $d_6 > d_7 > d_8 > d_9 > d_{10}$)。

【0 1 7 9】

この構成によれば、羽部 (9 0 4) の回転中心点 (羽付根部 9 0 4 c) に近い側と羽部 (9 0 4) の回転中心点 (羽付根部 9 0 4 c) に遠い側の剛性の違いをより単純な手法により実現することができる。

【0 1 8 0】

また、羽部 (9 0 4) は、図 2 2 に示すように、羽部 (9 0 4) の前縁 (9 0 4 a) と羽部 (9 0 4) の後縁 (9 0 4 b) とに沿って延びる回転軸 (9 0 4 x) が、羽部 (9 0 4) の前縁 (9 0 4 a) と羽部 (9 0 4) の後縁 (9 0 4 b) との間のほぼ中央部に位置するように設けられていることが望ましい。

【0 1 8 1】

このような構成によれば、羽部 (9 0 4) の前縁 (9 0 4 a) と羽部 (9 0 4) の後縁 (9 0 4 b) とに沿って延びる回転軸 (9 0 4 x) が、前縁 (9 0 4 a) 側および後縁 (9 0 4 b) 側のうちのいずれか一方に偏った場合よりも、羽部 (9 0 4) の上下に発生する圧力の差を大きくすることができる。

【0 1 8 2】

また、制御部（901）は、図23に示すように、羽部（904）の羽ばたき運動の両端死点における羽部（905）の切り返しの動作の際に、切り返し直前の羽部（904）の羽ばたき運動により発生した渦（R）の上方に羽部（904）の下面が接触するように、駆動部（905）を制御することが望ましい。

【0183】

この構成によれば、羽部（904）の切り返しの際の浮上力の低下を補うことができるとともに、羽部（904）の変形の反転を行うことができる。

【0184】

また、制御部（901）は、図23に示すように、羽部（904）の切り返しの際に、切り返しにより発生する渦（R）の回転中心軸（ X_1 ）が延びる方向と羽部（904）の曲率中心軸（ X_2 ）が延びる方向とが一致するような弾性変形をするように、駆動部（905）を制御する。

【0185】

この構成によれば、羽部（904）の羽ばたき運動によって羽部（904）に生じる下向きの力を極力小さくすることができるため、羽ばたき浮上移動装置（90）の浮上力の低下を極力抑制することができる。

【0186】

また、羽部（904）は、図24に示すように、駆動部（905）により駆動されたとき、羽部（904）の部位によって弾性変形に位相差（羽ばたき角 α ：ストローク角）がある。

【0187】

この構成によれば、羽部（904）の部位によって発生する浮上力等のピークのタイミングが異なるため、羽部（904）に急激な加速度が生じることを抑制することができる。

【0188】

また、羽部（904）は、図24に示すように、羽部（904）の相対的に大きな流体力が及ぼされる部位（羽先端部904d）の位相が、羽部（904）の相対的に小さな流体力が及ぼされる部位（羽付根部904c）の位相に比較して遅れた位相遅れを有するように（羽ばたき角 α ：ストローク角）、弾性変形する

ことが望ましい。また、図 2 4 に示すように、羽部 (9 0 4) は、羽部 (9 0 4) の付根部 (9 0 4 c) の位相が、羽部 (9 0 4) の先端部 (9 0 4 d) の位相に比較して遅れた位相遅れを有するように (羽ばたき角 α : ストローク角)、弾性変形することが望ましい。

【 0 1 8 9 】

この構成によれば、羽部 (9 0 4) の各部位それぞれに衝突する流体が羽部 (9 0 4) に及ぼす力が相違することによって生じる、羽部 (9 0 4) の各部位の加速度の相違を小さくすることができる。

【 0 1 9 0 】

また、前述の位相遅れ (羽ばたき角 α) は、羽ばたき運動の 1 周期の $1/2$ (羽ばたき角 π) 以下であることが望ましい。このようにすることにより、羽部 (9 0 4) は羽ばたき周期の $1/2$ で羽ばたき運動の方向が反転するため、前述の位相遅れ (羽ばたき角 α) を羽ばたき運動の 1 周期の $1/2$ 以下にすることにより、羽部 (9 0 4) の先端部 (9 0 4 a) にかかる力の位相と羽部 (9 0 4) の付根部 (9 0 4 b) にかかる力の位相とを同じ符号の位相に維持することができる。

【 0 1 9 1 】

また、制御部 (9 0 1) が駆動部 (9 0 5) を制御する態様と、羽部 (9 0 4) の弾性変形の態様とは、流体・構造連成解析の結果、羽ばたき浮上移動に関する所定のパラメータが最も優れた値になるように関連付けられていることが望ましい。

【 0 1 9 2 】

このように構成することより、羽部 (9 0 4) の変形の影響が定量化された羽部を有する羽ばたき浮上移動装置 (9 0) となる。

【 0 1 9 3 】

また、羽ばたき浮上移動に関する所定のパラメータが、羽部 (9 0 4) の羽ばたき運動によって生じる浮上力であってもよい。

【 0 1 9 4 】

この構成によれば、羽ばたき運動により、最大の浮上力を生じさせることがで

きる羽部を有する浮上移動装置（90）となる。

【0195】

また、前述の羽ばたき浮上移動に関する所定のパラメータが、羽部（904）の羽ばたき運動によって生じる浮上力を羽部（904）の駆動に必要なトルクで除算した値であってもよい。

【0196】

このように構成することにより、1トルク当りの浮上力が最も大きな浮上移動装置（90）となる。すなわち、同一浮上力を生じさせるためのトルクが最も小さい駆動部（905）を用いることができる。そのため、浮上により有利になる羽ばたき浮上移動装置（90）となる。なお、本実施の形態の羽ばたき浮上移動装置（90）においては、トルクとは、特に断らない限り、羽部（904）の駆動に用いられる回転力の強度を指す。

【0197】

また、前述の羽ばたき浮上移動に関する所定のパラメータが、羽部（904）の羽ばたき運動によって生じる浮上力を、その浮上力を生じさせるときの羽部（904）の羽ばたき運動の周波数で除算した値であってもよい。

【0198】

この構成によれば、駆動周波数の上限が最も小さい駆動部（905）を用いることができる。すなわち、羽部の剛性が低いために、駆動部（905）の駆動周波数を大きくできない場合に、軽量の駆動部（905）を用いることができる。そのため、浮上により有利な羽ばたき浮上移動装置（90）になる。

【0199】

また、前述の羽ばたき浮上移動に関する所定のパラメータが、羽部（904）の羽ばたき運動によって生じる浮上力を、浮上力を生じさせるために必要なエネルギーで除算した値であってもよい。

【0200】

この構成によれば、羽ばたき運動に用いるエネルギーを最も小さくすることができる。そのため、例えば、同一の浮上力を生じさせる場合であっても、よりエネルギー源部が小型化された浮上移動装置（90）にすることが可能になる。

【0201】

なお、本実施の形態の羽ばたき浮上移動装置（90）においては、羽ばたき運動に用いるエネルギーとは、特に断らない限り、羽部（904）を駆動させる駆動部（905）において消費されたエネルギーである。エネルギーの代表例としては、駆動部（905）の消費電力が挙げられる。

【0202】

また、羽部（904）は、羽部（904）の羽ばたき周波数 f 、羽部（904）の代表長さ L 、剛性が最も高い部位からの距離 r 、剛性が最も高い部位から距離 r の部位にかかる荷重 w 、荷重 w によって生じる変位 d とすると、 $0.36 \times 10^{-8} < r^3 \times w / d / (L \times f)^2 < 4.48 \times 10^{-8}$ の関係が成立するものであることが望ましい。

【0203】

この構成によれば、浮上力の絶対値、トルクに対する浮上力の効率、羽部の駆動エネルギーに対する浮上力の効率を最適値の $1/2$ より劣化させることなく羽ばたきことができる羽部（904）を有する浮上移動装置（90）となる。

【0204】

次に、本実施の形態の羽ばたき浮上移動装置（90）の設計に用いる流体・構造連成解析および羽ばたき浮上移動装置の製造方法の一般的手法を具体的に記載する。なお、以後、特に断らない限り、流速とは、空間に固定された座標系に対する流速、すなわち絶対流速を指すものとする。

【0205】

表1～6および図25～図44を用いて、実施の形態1の流体・構造連成数値モデルの作成方法およびそれを用いた羽ばたき飛行ロボットの製造方法を説明する。

【0206】

本実施の形態の流体・構造連成数値モデルの作成方法は、昆虫が空気中で羽ばたき飛行する場合の、昆虫の羽根の構造および昆虫の羽ばたき飛行態様を解析して得られる、流体としての空気に関する数値モデルおよび羽根の構造に関する数値モデルを作成するためのものである。

【 0 2 0 7 】

また、本実施の形態の羽ばたき飛行ロボットの製造方法は、前述の流体・構造連成数値モデルの作成方法により作成された数値モデルを用いて、昆虫の羽根の構造および昆虫の羽ばたき飛行態様が模倣された羽ばたき飛行ロボットを製造するためのものである。

【 0 2 0 8 】

具体的には、流体に関する数値モデルとは、流体に関する流速および圧力の数値モデルのことを指す。また、構造に関する数値モデルとは、主に、流体に接する構造物の移動および変形などの運動の態様の数値モデル、ならびに、構造物に作用する内部応力などの力の数値モデルを指す。

【 0 2 0 9 】

本実施の形態の流体・構造数値モデルの作成方法においては、実際のトンボの飛翔に関する数値モデル化について説明する。より具体的に言うと、飛翔するトンボの羽根の構造に関する数値モデルおよび羽根の周囲の空気に関する数値モデルを作成する手法について説明する。すなわち、羽ばたくトンボの羽根の周囲の空気の流速および圧力の数値モデルと、トンボの羽根の構造が周囲の空気から受ける圧力、トンボの羽根を駆動する外力（駆動力）、トンボの羽根構造の垂直応力（圧力または張力）および剪断力などの力、トンボの羽の並進移動または回転移動、ならびに、トンボの羽根の変形などの数値モデルとを、実物のトンボの空気中での羽ばたき飛行において計測された計測データに流体・構造連成解析を用いることによって求める手法を述べる。

【 0 2 1 0 】

なお、本実施の形態の流体・構造数値モデルの作成方法においては、力学的要素についてのみ数値モデル作成を行なうが、筋肉の駆動モデル、筋肉を駆動する神経系のモデル、脳における情報処理のモデル、および、情報処理のもとになる感覚器官におけるセンシングのモデルなどの数値モデルについても、同様の手法を適用することが可能である。

【 0 2 1 1 】

（流体・構造連成数値モデルの作成の手順の概要）

まず、流体・構造連成数値モデルの作成の手順の概要について図 2 5 を用いて説明する。

【0 2 1 2】

本実施の形態における流体・構造連成数値モデル（単に「数値モデル」という場合もある。）の作成の手順は、1. 基準構造の計測、2. 基準構造のモデリング、3. 実構造物の計測、4. 基準構造の補間による、実構造等価数値数値モデルの作成、5. 羽ばたき代表点の位置の時系列データの計測、6. 本体（羽以外の構造部分）のモデリング、7. 流体・構造連成解析の各プロセスに分けられる。

【0 2 1 3】

プロセス 1 ～ プロセス 4 により、羽根の形状と剛性とを数値で表現する、羽根の実構造等価モデルの数値モデル（以後、「実構造等価数値モデル」と称する。）を作成し、プロセス 5 により、羽根の羽ばたき飛行態様の数値モデル、すなわち、羽根の駆動力モデルを作成する（以後、「羽ばたき運動数値モデル」と称する。）。

【0 2 1 4】

なお、プロセス 6 の本体のモデルは、説明の簡便のため、形状および質量分布のみが数値化されているものとする。つまり、本体のモデルは、流体に対する境界条件を与える役割、および、羽根の支点において並進移動や回転のための慣性を与える役割のみに用いられているものとする。

【0 2 1 5】

ただし、実際には、本体の数値モデルも、その位置、姿勢および形状を変化させることが考えられるが、たとえ、これらを考慮する場合であっても、位置、姿勢および形状の変化についても、数値モデルとしては、羽根の流体・構造連成数値モデルの作成方法と同様の方法を適用して作成することができる。

【0 2 1 6】

より具体的な数値モデルの作成の手順は、次に述べるようなものである。

まず、必要に応じて、あるトンボ（以後、「個体 A」と称する。）の羽根を生体から切離すなどして、羽根の構造に関する物理量を精密に測定する。それによ

り、その測定された物理量を用いて基準構造数値モデルを作成する。また、他の個体（以後、「個体B」と称する。）の羽ばたき飛行態様の物理量を測定して、その測定された物理量を用いて羽ばたき運動数値モデルを作成する。

【0217】

次に、個体Bに対しては、個体Bを損傷しない状態で計測可能な羽根の部位のうちの代表点の構造に関する物理量を測定する。この代表点の物理量のデータを用いて、個体Aの構造に関する数値モデル、すなわち、基準構造数値モデルに何らかの変換を加えることで、個体Bの羽根の構造の数値モデルと等価とみなすことができる数値モデル、すなわち、実構造等価数値モデルを作成する。

【0218】

そして、個体Bの羽の実構造等価数値モデルを、個体Bより直接測定した羽ばたき方によって駆動する際の流体の挙動および構造の挙動を、流体・構造連成解析によって算出する。これにより、個体Bについて、周囲の流体からの影響を含めた羽ばたき運動時の流体・構造連成数値モデルが作成される。

【0219】

次に、前述の手法により得られた流体・構造連成数値モデルをベースとして、羽ばたき飛行ロボットを製造する手順について述べる。

【0220】

以下、各手順について、図25～図38を用いて詳細に説明する。

（基準構造数値モデルの構造に関する物理量の計測）

まず、基準構造数値モデルを作成するための、個体Aの構造に関する物理量の計測を行なう。一般に、構造物の運動方程式は、バネとダンパ、つまり、変位に対する弾性力と速度に対する減衰比とを用いて、外力と加速度との式で表わされる。

【0221】

ところで、一般に、構造における内部応力の減衰は、構造内部において運動エネルギーが熱エネルギーへ変換されることにより行なわれる場合に起きるが、これは構造の変化または破壊が起きていることに相当する。ところが、たとえば、羽ばたき周波数30Hzのトンボが羽根を自律的要因で破壊することなく1週間以上

飛び続けることを考えると、数周期での羽ばたき運動では、上記羽根の構造の変化（塑性変形）は極めて小さいものと考えられる。よって、実施の形態においては、構造における内部応力の減衰はゼロであるものとする。すなわち、羽根に関しては、弾性変形はするが、塑性変形はしないものとして取り扱うこととする。

【 0 2 2 2 】

これにより、構造における運動方程式は、変位に対する弾性、すなわち、羽根の剛性、羽根の質量、および、外力によって表わされることになる。

【 0 2 2 3 】

すなわち、羽の構造モデル作成に必要なパラメータは、羽の形状、剛性および質量の3つである。以後、これらの計測方法について図 2 6 ～ 図 3 1 を用いて述べる。

【 0 2 2 4 】

（基準構造数値モデルの形状計測）

まず、羽根の形状計測に関して、図 2 6 および図 2 7 を用いて説明する。

【 0 2 2 5 】

図 2 6 に示すように、本実施の形態にて用いるトンボの羽根 2 は、枝状に分布する梁構造 2 1 に膜構造 2 2 が貼られている構成となっている。後に述べる剛性モデリングのために、この梁構造 2 1 と膜構造 2 2 との位置関係を把握しておく必要がある。

【 0 2 2 6 】

このために、本発明者らが形状計測に用いたのは以下の手法である。

まず、3次元での羽根の形状の把握のため、一般的に市販されているX-Yステージ 3 3 と、このX-Yステージ 3 3 の主表面にほぼ垂直な方向の距離を計測可能な状態に配されたレーザ距離計 3 2 とを用いる。

【 0 2 2 7 】

図 2 7 に示すように、レーザ距離計 3 2 をX-Yステージ 3 3 の主表面内のある位置に定位させた状態で、羽根 2 までの距離を、レーザ距離計 3 2 によって計測する。これにより、羽根 2 全体の形状が把握される。すなわち、X-Yステージ 3 3 の主表面上のレーザ距離計 3 2 の位置を特定可能な位置指定パラメータ x

(i), $y(i)$ と、この際のレーザ距離計 3 2 の計測値 $z(i)$ とを用いて、パラメータ ($x(i)$, $y(i)$, $z(i)$) の集合で表わされる形状が、測定された羽根 2 の形状である。

【 0 2 2 8 】

また、図 2 6 に示すように、画像スキャナまたはデジタルカメラなどの画像取得手段により、X-Y ステージ 3 3 の主表面にほぼ平行な面内における羽根 2 の画像を取得し、これにより梁構造 2 1 の X, Y 方向の位置を得ることができる。羽根 2 を X-Y ステージ 3 3 の主表面のほぼ平行な位置に配置すれば、羽根 2 における梁構造 2 1 は、Z 方向に重複して存在することはないので、梁構造 2 1 は前述の画像より計測された $x(i)$, $y(i)$ に対応するレーザ距離計 3 2 により計測された Z 方向の距離、すなわち、計測値 $z(i)$ の位置にのみ存在することになる。

【 0 2 2 9 】

これによって、すべての梁構造 2 1 の x , y , z を座標軸とするときの配置が決定される。なお、羽根 2 の形状を把握する手法は、3 次元で梁構造 2 1 の配置を含めて羽根 2 の形状を把握することができる手法であれば他の手法であってもよい。

【 0 2 3 0 】

たとえば、市販のレーザ距離計 3 2 の多くは、レーザ光が十分に戻ってこない場合に、計測精度が低下する。このレーザ光が十分に戻ってこない状態を検出するために、市販のレーザ距離計 3 2 の多くには、レーザの戻り光量をモニタするためのモニタ機能が付加されており、このモニタ機能によって、レーザ距離計 3 2 の測定時における反射率を算出することができる。なお、トンボの羽の場合、膜構造 2 2 はほとんど透明であるので、散乱光の大小を、羽根 2 の位置に対してマッピングすることによって、羽根 2 の梁構造 2 1 を検出する手法を用いてもよい。

【 0 2 3 1 】

(基準構造数値モデルの剛性計測)

羽根の剛性計測は、基本的には一般的な手法がそのまま適用可能である。より

詳細言うと、次のような手法である。まず、前述したように、羽根 2 は梁構造 2 1 と膜構造 2 2 との複合構造であるので、羽根 2 の各代表的な部位については、梁構造 2 1 と膜構造 2 2 とを分離する。この分離された梁構造 2 1 および膜構造 2 2 それぞれについて引張り強度試験、曲げ強度試験などを行なうことにより、剛性を決定する。さらに、膜構造 2 2 の一部に一定形状の孔を開ける。その孔形状の変形から、膜構造 2 2 にかかる張力を逆算する。

【 0 2 3 2 】

しかしながら、この手法は煩雑であるという問題がある。また、この手法では、梁構造と膜構造の相互作用の結果、曲げ剛性が決定されるので、両者の誤差を含んでしまうという問題もある。

【 0 2 3 3 】

ところで、羽根の変形は、曲げによる変形と、引張りによる変形とに分けられるが、昆虫の羽根は非常に薄いため、羽根の変形を大きく支配するものは曲げによる変形である。すなわち、昆虫の羽根は、歪が微小でかつ変形が大きい。

【 0 2 3 4 】

そこで、本実施の形態においては、羽根 2 をシェル構造の集合体として近似する。すなわち、1つの膜構造 2 2 および梁構造 2 1 の複合要素を1つのシェル構造として取扱う。これにより、羽根の剛性については、羽根全体をシェル構造の複合体と考えて、梁構造 2 1 と膜構造 2 2 とを複合した状態のまま測定すればよい。このように、羽根全体をシェル構造の複合体と考えて、羽根および流体の挙動を主に決定する羽根の曲げ剛性を、昆虫の羽根から直接測定することで、実質上、実物の昆虫の羽根の曲げ剛性に近い値の曲げ剛性を有する羽根の基準構造数値モデルを作成することができる。また、梁構造と膜構造との複合要素に比べて梁構造を除外した分だけ、基準構造数値モデル作成のための計算量を低減することができ、作業の効率化を図ることができる。

【 0 2 3 5 】

なお、羽根 2 の各部位について、個別に計測を行なうため、羽根 2 が損壊（分割）した状態で測定せざるを得なくなることが十分考えられる。そのため、後述する実構造等価数値モデル作成の観点から、これらの剛性測定は、羽根 2 が均一

に乾燥した状態で行なわれることが望ましい。

【0 2 3 6】

（基準構造数値モデルの質量分布の計測）

剛性の計測の項で説明したように、羽根 2 の構造を梁構造 2 1 と膜構造 2 2 とに分けるのであれば、分けた状態での羽根の代表的な部位の梁構造 2 1 と膜構造 2 2 との各々の質量を計測すればよい。しかしながら、羽根 2 をシェル構造として取扱うのであれば、羽根 2 の各部位の梁構造 2 1 および膜構造 2 2 の複合構造の質量を計測すればよい。

【0 2 3 7】

また、実際には、羽根 2 は生体より切離されると乾燥を始め、質量が軽減されてしまうので、まず、生体より切離した時点で羽根 2 全体の通常状態の質量を計測しておく。その後、羽根 2 を十分乾燥させた後に再び羽根 2 全体の乾燥状態の質量を計測する。乾燥した羽根 2 を測定するための各部位ごとに分割して、分割された各々の部位について質量を測定する。そして、通常状態の羽根 2 全体の質量に対する乾燥状態の羽根 2 全体の質量の比で、先の乾燥状態での分割された羽根 2 の各部位の計測された質量を除算することで、通常状態での羽根 2 の分割された各部位の質量に変換することが望ましい。

【0 2 3 8】

これらより得られた質量を、質量を測定した断片のサイズにより除算しておき、その除算された値を質量分布とする。たとえば、シェル構造の場合、断片の面積で断片の質量を除算することにより、単位面積当りの質量が求まる。

【0 2 3 9】

以上により、羽根 2 の形状、および、羽根 2 の代表部位での剛性と質量とが測定される。

【0 2 4 0】

（基準構造のモデリング）

続いて、基準構造となる個体 A の羽根 2 の構造のモデリングについて、図 2 6 ～図 2 8 を用いて説明する。

【0 2 4 1】

一般に、構造の解析に多用される手法は、羽根 2 を単位構造の集合として分割し、かつ、分割された単位構造に対して種々の物性値を付与する手法である。この単位構造を一般的にメッシュと呼ぶ。

【 0 2 4 2 】

本実施の形態では、羽根の単位構造をシェル構造として取扱う。すなわち、羽根 2 は、上記の形状、質量分布、および、剛性からなる物性値を有するシェル構造の集合体によって表現される。

【 0 2 4 3 】

(形状のモデリング)

形状に関しては、各メッシュを構成するノード（メッシュを示す線の交点）の位置を付与する。また、解析手法によっては、各ノードの有する姿勢（複数の点位置データ）を付与する。

【 0 2 4 4 】

この際、メッシュ分割は、梁構造 2 1 の方向を基準に行なわれることが望ましい。特に、コルゲーションと呼ばれる凹凸が梁構造 2 1 を稜線として走っており、このコルゲーションを境として、羽根 2 の物性値も極端に変化するので、1つのメッシュは、この梁構造 2 1 を横切らないことが望ましい（これが梁構造 2 1 の配置の把握が重要な理由である）。これらの点以外は、メッシュ作成方法は従来から用いられてきた手法と比べ、特に変更を要する部分はない。

【 0 2 4 5 】

(剛性のモデリング)

次に、各メッシュに剛性を付与する。

【 0 2 4 6 】

あるメッシュにおける剛性、すなわち、ある外力に対する変形を決定する基本的なパラメータは、ヤング率、ポアソン比、およびメッシュの厚みである。

【 0 2 4 7 】

前述のように本実施の形態における羽の変形は、歪みが微小でかつ変形が大きいものである。これらシェル構造の変形は、ヤング率と断面 2 次モーメントとの積によりほぼ決定される。なお、ポアソン比は変形にほとんど影響を与えな

いので、一般的な値とされている 0.3 を用いる。また、後述する実構造等価数値モデル作成の観点から、ヤング率は、全代表位置での計測の結果得られた値の平均など、ある程度ラフな値を用いて構わない。そして、各代表位置において計測された曲げ剛性を用いて、理論解または数値計算結果からメッシュの厚みを逆算する。

【0248】

たとえば、長さ l 、高さ h 、幅 b の梁の一端を固定し、他端に高さ方向に荷重 w を与えた際の高さ方向の梁の変位 x は、 x が l に比べて微小であるなら、 $x = w \times l^3 / (E \times b \times h^3 / 12)$ と表わされ、シェルの幅 b は測定により求まるため、ヤング率 E が既知であれば、梁の高さ h を算出することができる。ここでは、 $E = 1.0 \times 10^9$ とする。

【0249】

これにより、各代表位置でのメッシュの厚みが決定されるので、これを補間した値を各メッシュに付与する。なお、各代表位置での厚みは、梁構造 21 と膜構造 22 との複合構造として曲げ剛性を表現するための厚みであり、梁構造 21 そのものの厚みおよび膜構造 22 そのものの厚みのいずれとも異なる。例として、MITC (Mixed Interpolation of Tensorial Components) 4 節点シェル要素を用いたモデルの厚み分布を図 28 に示す。

【0250】

(質量のモデリング)

質量は、単純に、各代表位置での質量計測結果から算出される単位面積当りの質量を補間して求まる。メッシュの位置での単位面積当りの質量に、メッシュの面積を乗じた値を付与すればよい。

【0251】

以上により、羽根 2 の形状、剛性、および、質量分布を表現した構造に関する物理量の数値モデルが作成される。以後これを、基準構造数値モデルと称する。

【0252】

(実構造等価数値モデルの作成)

ここでは、図 29～図 31 を用いて、生体である個体 B を損壊せずに固体 B の

代表的な部位の形状と代表的な部位の剛性とを計測する手法について説明する。

【 0 2 5 3 】

（代表形状の計測）

代表形状を計測する場合は、まず、羽根 2 0 を撮影した画像などから、代表的な構造、たとえば、羽根 2 0 の外形線や、梁構造 2 1 の特徴的な分岐点からの距離を計測する。これにより、基準構造数値モデルに対する形状の比率 α 、すなわち、ある共通の基準点から測定点までの羽根 2 0 の基準構造数値モデルに対する距離の比率を算出する。たとえば、外形線を計測し、羽根 2 0 の長手方向の長さが、基準構造数値モデル l_1 、ここで計測した個体 B すなわち羽根 2 0 の外形線が l_2 であるなら、形状の比率 $\alpha = l_2 / l_1$ となる。

【 0 2 5 4 】

（代表剛性の計測）

ここでは、生体である固体 B を破壊せずに、羽根 2 0 の代表的な部位の剛性を計測する手法を説明する。

【 0 2 5 5 】

一般に、剛性測定は、ある物体の一端を固定し、他の部位にある荷重をかけ、これに対する変位量を計測することで行なわれる。このため、上述の固定は、他の部位にかけられる荷重によって変化しないだけの強固なものであることが望ましい。ところが、生体を生理的に損傷することなく測定するには、荷重が羽根 2 0 に与えるダメージが小さいことが要求される。

【 0 2 5 6 】

そこで、生体の羽根 2 0 を損壊せずに、代表的な剛性を正確に測定するためには、以下の 2 通りの手法が考えられる。

【 0 2 5 7 】

1 つは、羽根 2 0 の凹凸形状に合わせた固定手段を用いる手法である。しかしながら、昆虫の羽の個別の形状の差異によっては、それに応じた固定手段を用意する必要があため、固定手段を用意する手間が煩雑である。

【 0 2 5 8 】

そこで、固定による形状の差異の少ない部分に対して上記手法を適用すること

が望ましい。たとえば、図 29 に示す羽根 20 の先端後部はほぼ平面であるので、この領域を図 30 に示す如く線上に固定し、他の部位に荷重をかけ、変位を測定する。

【0259】

または、丈夫な羽根 20 の梁構造 21 部分、特に、羽根 20 の梁構造 21 の根元部分を固定する手法も有効である。たとえば、図 31 に示すように、梁構造 21 の根元を固定しておき、羽根 20 の先端部分において荷重変位関係を計測する。

【0260】

(基準構造数値モデルの変換による実構造等価数値モデルの作成)

ここでは、基準構造数値モデルを、固体 B すなわち羽根 20 の生体の代表値計測によって得られた代表的な測定値を利用して変換し、実構造等価数値モデルを作成する手法について説明する。

【0261】

まず、代表形状の計測によって求まった形状の比率 α によって、基準構造数値モデルの拡大縮小を行なう。この拡大縮小されたモデルを中間モデルと称する。

【0262】

すなわち、各メッシュのノードの座標とメッシュの厚みとをそれぞれ P 、 T 、 P 、 T それぞれを代表形状によって求まった形状の比率 α によって変換された後のノードの座標を P' 、メッシュの厚みを T' とすると、 $P' = P \times \alpha$ および $T' = T \times \alpha$ の関係が成立する。中間モデルにおいては、形状と質量が個体 B のそれをほぼ反映したものとなっている。

【0263】

続いて、この中間モデルに、上記個体 B の代表剛性の計測に用いた条件と同様の力学的条件、すなわち、固定条件と荷重条件とを数値モデル上で与え、数値解析により構造の変形量を求める。そして、生体の代表値剛性と同等の荷重における変位が β であるならば、各メッシュのヤング率 E を、 $E' = E \times \beta$ によって求める E' に変更する。

【0264】

すなわち、中間モデルにおける、ある力学的条件に対する変位の値が、生体より計測された同条件での変位の値の 0.5 倍であるならば、中間モデルのヤング率を 0.5 倍にすることで、生体と同等の荷重変位関係を有するように中間モデルを変換する。

【 0 2 6 5 】

これにより、中間モデルのヤング率を変換したモデルは、形状、質量および剛性それぞれが、個体 B における羽根 20 とほぼ一致する。これ以後、実構造等価数値モデルと称する。以上のプロセスにより、実構造等価数値モデルが作成される。

【 0 2 6 6 】

(羽ばたき代表点位置計測)

続いて、個体 B における羽ばたき代表点の位置計測により、羽根 20 を駆動する姿勢（位置データの数値モデル）、すなわち、羽ばたき方のモデルを作成する手法について説明する。羽根 20 の姿勢（位置データの数値モデル）は、第一義的にはアクチュエータの駆動態様そのもの、すなわち、羽根の支点の位置と姿勢である。ところが、羽根の支点は固体 B の体内にあり、実質上測定は不可能である。また、実質上有用であると思われる、高速度カメラ等の映像からの計測では、点の位置は計測できても姿勢は計測できない。

【 0 2 6 7 】

そこで、羽根の支点と実質上等しい位置と姿勢を有する、高速度カメラにて撮影可能な 3 点の位置を計測し、この 3 点がなす平面の姿勢をこの 3 点それぞれの姿勢とみなすことで、羽根 20 の姿勢を近似的に決定する。すなわち、羽根 20 の支点を含む、変形量の微小な領域は、羽根 20 の支点と同じ姿勢である。つまり、この領域内における 3 点のなす平面の姿勢は、羽根 20 の支点の姿勢を表している。以上より、羽根 20 の姿勢は、この領域内に含まれる 3 点の位置データで表すことができる。

【 0 2 6 8 】

より具体的には、羽根 20 の上のなるべく変形の小さい位置に 3 つのポイントマーカを配し、高速度カメラなどで撮影した羽根 20 の画像からポイントマーカ

の位置を計測する手法が考えられる。姿勢の決定の精度から、3つのポイントマーカによって形成される角度は 90° に近いことが望ましい。また、より望ましくは、3つのポイントマーカが直角二等辺三角形をしていることが望ましい。これらの位置計測を、個体Bの飛翔を高速度撮影した画像から、ポイントマーカの位置を計測することによって行なう。

【0269】

この点の位置計測手法としては、従来から用いられている羽根の所定の点の位置計測手法を用いる。本実施の形態の流体・構造連成数値モデルの作成方法においては、上記ポイントマーカの位置を、2方向から高速度カメラにより撮影した画像上の位置を用いて算出した。ただし、高速度カメラの画像は、量子化されている。したがって、本実施の形態の流体・構造連成数値モデルの作成方法においては、量子化誤差に起因した所定の点の位置ずれを緩和するために、スムージングを行なっている。流体から及ぼされる力は速度の関数であるため、スムージングは、上記ポイントマーカの位置の時刻歴を時刻で微分した、速度の時刻歴について行なうことが望ましい。なお、スムージングが実行可能であるためには、前述の速度の時刻歴は、連続（連続関数）である必要がある。また、直接直交座標計での位置の時刻歴の時間微分値のスムージングを行なったのでは、各ポイントマーカ間の距離が変化してしまう可能性がある。そのため、このスムージングは、3点により構成される平面の位置と姿勢とを分離した状態で、すなわち、この3点により構成される平面の並進速度と角加速度について行なわれることがより望ましい。なお、点の位置計測手法は、羽根20のある3点の位置を決定することができる手法、すなわち、羽根の所定の領域の姿勢を決定することができる手法であれば、前述の手法に限定されるものではない。

【0270】

以下、本実施の形態の流体・構造連成解析で用いる実構造等価モデルを、図39～図46を用いて具体的に示す。

【0271】

本実施の形態においては、羽の根元の要素についてこの3点の位置を与える。図39は、図28における羽根の根元の要素、つまり左下角の要素のみ抽出した

ものに、本実施の形態での解析で用いたノード番号と要素番号を付記したものである。ここでは、ホバリング状態を想定し、ノード 7 1 は原点即ち (0, 0, 0) に固定とする。そして、この羽根の姿勢は、図 4 0 に示すように、残りの 2 点、即ちノード 8 3 とノード 3 3 7 の位置即ち x 、 y 、 z 座標の時刻歴によって数値モデル化される。

【0 2 7 2】

筆者らが、前述の東らの文献より算出した羽根の挙動を、図 4 0 に示した座標系において、羽根の打ち下ろしについて時刻と共に示したのが図 4 1 である。また、図 4 2 にノード 8 3 の、図 4 3 にノード 3 3 7 の x 、 y 、 z 座標値の時刻歴を示す。

【0 2 7 3】

(流体・構造連成解析)

ここで、流体・構造連成解析によって、数値モデルを作成する手法について、図 2 7 ～図 3 5、図 3 9、図 4 4 を用いて説明する。

【0 2 7 4】

本発明者らが用いた解析手法は、張 群 (1 9 9 9 年度東京大学学位論文「構造座屈と領域変形を行なう構造・流体連成問題の A L E (Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method) 有限要素解析」) により示された A L E 有限要素法解析による、流体・構造の強連成解析方法である。以下にその適用手法を述べる。なお、A L E とは、参照座標系を用いてオイラー表記 (流体) とラグランジェ表記 (構造) を統一的に扱う手法である。また、有限要素法は、解析領域を有限要素に分割して、その要素内で近似を用いて統合した方程式を解く手法のことである。この手法は、差分法と異なり、自由形状が扱え、数学的に収束性が証明されている。

【0 2 7 5】

まず、数値モデルを作成するための仮想空間を設定する必要がある。本発明者らの計算によると、羽根の長さ 4 c m、羽ばたき周波数 3 0 H z である場合、概ね 2 0 c m 以遠において空気の流れはほぼ定常流となる。このため、数値モデルを作成するための構造物を含む半径 2 0 c m の球体内の空間を、流体・構造連成

解析の対象とすることで、計算量を減らすことができる。

【0276】

ここでは説明の簡便のため、1辺20cmの立方体のケースのほぼ中央のトンボが位置し、停空飛翔すなわちホバリングを行なっている際の流体・構造連成数値モデルを作成するものとする。

【0277】

ALE有限要素法においては、次のA～Dの4つパラメータを流体および構造の両者において設定する必要がある。なお、以下、Aは各節点の座標、Bは各節点のコネクティビティ、Cは各節点の境界条件、Dは各要素の物性値とする。

【0278】

(構造要素)

A、B、Dは実構造等価数値モデルを作成した時点で決定される。

【0279】

Cについては、羽ばたき運動数値モデルとして計測された羽根20に記したマーカの時系列的に表現された位置データを、実構造等価数値モデルのメッシュのノードの強制変位として与える。

【0280】

(流体要素)

流体要素はメッシュが用意されていないので、たとえば、市販のメッシュ作成ソフトなどを用いて作成する。本発明者らが用いた流体・構造連成解析手法においては、流体のメッシュにおいても構造のメッシュと共通のノードを有する必要があるため、まず、羽根を含む平面のメッシュを四辺形要素にて作成し、これを上下に掃引（スイープ）することによって六面体メッシュを作成する。また、羽根以外の四辺形メッシュについては、六面体メッシュの作成後、削除した。これを図32および図33に示す。

【0281】

これにより、流体要素についても各節点の座標、コネクティビティが作成される。また、境界条件として、羽根のノードと、立方体のケースの外壁を構成する

ノードについては、固着境界条件を付与するとともに、空気の質量密度、粘性係数および体積弾性率を、各流体要素の物性値として与えた。

【 0 2 8 2 】

そして、定常的にホバリングしている状態に収束した運動の態様に関する数値モデルを得るために、1周期の羽ばたきを、複数回反復して行なう状態を解析することにした。

【 0 2 8 3 】

【実際のデータ】

解析で実際に用いたデータを表1～表6を用いて説明する。

【 0 2 8 4 】

各節点の座標については、流体・構造両者に共通である。よって、これは、表1に示す通り、各ノードに番号を振ってNode1、Node2・・・とし、各ノードのx、y、z座標と共に列記したものとなる。これを表1では、NodeCoords.datと名付けている。

【 0 2 8 5 】

【表1】

NodeCoords.dat			
Index	x	y	z
Node1	-0.03616	0.03895	0.04457
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
Node71	0	0	0
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
Node83	0.001	0	0
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
Node337	0	0.001	0
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

【 0 2 8 6 】

続いて、羽根の構造を指定するため、羽根を構成するノードのコネクティビティを指定する必要がある。これは、図 3 9 に示される要素 1 について、左下角の点から反時計回りに、Node71、Node83、Node142、Node337、と指定することで、この 4 節点シェル要素を表現する。即ち、表 2 に示すとおり、羽根を構成する各シェルに番号を振って、ShellElement1、ShellElement2、・・・とし、各シェルを構成するノード番号を、先に説明した順に列挙したものを列記したものとなる。これを表 2 ではShellMesh.datと名付けている。

【 0 2 8 7 】

【表 2】

ShellMesh.dat				
element index	left front	right front	right back	left back
ShellElement1	71	83	149	337
.
.
.

【 0 2 8 8 】

同様に、流体領域に作成したメッシュについても、コネクティビティを指定する。但し、流体領域は 6 面体要素で表されている。更に、圧力というスカラー量を表現するため、各流体のメッシュについて更に 1 点、圧力節点と呼ばれる節点を付加する。コネクティビティを指定する順は、6 面体要素下面の 4 点を反時計回りに、続いて上面の 4 点を同じく反時計回りに、最後に圧力節点を、それぞれノード番号を列記することによって、合計 9 点のコネクティビティの集合が、表 3 のように表される。表 3 においてはこれを、FluidMesh.datと名付けている。

【 0 2 8 9 】

【表 3】

FluidMesh.dat									
element index	left front bottom	right front bottom	right back bottom	left back bottom	left front top	right front top	right back top	left back top	Pressure
FluidElement1	71	83	149	337	99	221	414	66	121
.
.
.

【0290】

また、流体、構造それぞれに物性値を付与する必要がある。表4は構造の物性値を付与するもので、表5は流体の物性値を付与するものであり、それぞれ、ShellMaterial.dat、FluidMaterial.datと名付けられている。ShellMaterial.datにおいては、羽の各構造要素について、ヤング率、ポアソン比、比重、厚みが列記されている。また、FluidMaterial.datにおいては、各流体要素について、粘性、比重、体積弾性率が列記されている。

【0291】

【表4】

ShellMaterial.dat				
element index	ヤング率	ポアソン比	比重	厚さ
ShellElement1	1.00E+09	0.3	1.20E+03	0.35E-03
.
.
.

【0292】

【表5】

FluidMaterial.dat			
element index	粘性	比重	体積弾性率
FluidElement1	1.81E-05	1.2	1.00E+05
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

【0293】

また、表6には、ShellMotion.datにおいて、羽根の節点におけるx、y、z座標の時刻歴が表されている。

【0294】

【表 6】

ShellMotion.dat					
Node/Time(sec)	0	0.0025	0.005	...	0.035
Node71_x	0	0	0	...	0
Node71_y	0	0	0	...	0
Node71_z	0	0	0	...	0
Node83_x	0.001	0.000669	0.000772	...	0.000689
Node83_y	0	-0.00053	-0.0004	...	-0.00059
Node83_z	0	0.000523	0.00049	...	0.000423
Node337_x	0	0.00043	-0.00015	...	-0.0006
Node337_y	0.000656	0.000848	0.000636	...	-0.00079
Node337_z	0.000755	0.000309	0.000758	...	-0.00013

【 0 2 9 5 】

なお、以上のデータは一例であり、データ形式、およびその数値はこれに限るものではない。

【 0 2 9 6 】

【計算結果】

以下、上記の手法により得られる数値モデルについての一例を示す。なお、この数値モデルは上記データにより得られたものであり、この数値モデルに限るものではない。

【 0 2 9 7 】

図 3 4 に、定常状態における羽根 2 0 の周囲での流体の挙動を数値モデルとして算出した結果を示す。矢印が羽根 2 0 のまわりの流速分布を表わしている。なお、計算時間の都合上、図 3 4 では、本体構造を略し、一方の羽根のみが動作するハーフモデルで解析した場合の流速分布を示している。また、表示の煩雑さを避ける都合上、羽根 2 0 に垂直な断面についてのみ流速分布を表示してある。

【 0 2 9 8 】

また、この手法により算出される、ノード 7 1, 8 3, 3 3 7 における y 軸方向の節点力の合計を示したのが図 3 5 である。強制変位を与えているのはこの 3 点なので、この点における節点力の合計が、本体に加わる力である。最初不規則であった節点力が、最終的には周期的な挙動に収束している。即ちこの時点で流体の挙動も構造の挙動も周期的となり、これはホバリング時の流体及び構造の挙

動と等価である。但し、図4-1に示すように、浮上力の発生する方向は、y軸負方向である。筆者らの計算によると、重力加速度 9.8 m/sec^2 の条件においては、図3-5から分かるように、羽根1枚につき 0.1 g 程度の質量を浮上させることができる。

【0299】

また、この際の羽根にかかる駆動トルクを図4-4に示す。尚、 θ_y はy軸正の方向への右ねじ回転方向へのトルクを、 θ_z は、z軸正の方向への右ねじ回転方向へのトルクを示す。

【0300】

これは、アクチュエータの駆動トルクそのものであるので、以上のデータより、トルク $1.5 \text{ gf} \cdot \text{cm} \sim 3.5 \text{ gf} \cdot \text{cm}$ のアクチュエータを用いて、羽根1枚につき 0.1 g の質量を地上より浮上させることができると言える。

【0301】

これにより、定常的なホバリングの際の流れの数値モデルを作成することができ、浮上可能重量や、これを実現するアクチュエータのトルクを求めることができる。

【0302】

(解析結果のロボット作製への応用)

ここでは、流体を含めた羽ばたきの数値モデルのロボット制御方法への適用等について、図2-5、図3-5～図3-8を用いて説明する。

【0303】

上述の手法により得られた数値モデルは、後述するI.アクチュエータ制御方法にて説明するが、そのままだでも羽ばたき飛行ロボットの制御に用いることが可能である。また、上述の流体・構造連成解析により得られた数値モデルそのものから、昆虫の利用している空力を解明し、解明された空力を利用して羽ばたき飛行ロボットを製造することもできる。また、実際の羽ばたき飛行ロボットの製造に関して、感度解析を用いてこの流体・構造連成数値モデルを変更し、この感度解析により変更された数値モデルに基づて羽ばたき飛行ロボットの羽根の構造や羽ばたき飛行の態様を決定することは工業上非常に有用である。

【0304】

羽ばたきロボットの制御方法の作成に関して、特に有用である、I.アクチュエータの制御方法の作成手法、および、II.昆虫の羽根をベースとした昆虫の羽根と異なる羽根の制御方法の作成手法を以下説明する。

【0305】

(アクチュエータ制御方法作成手法)

図36は、羽ばたき飛行ロボット制御系を示した模式図である。

【0306】

説明の簡便のため、アクチュエータ122とその制御系については、羽根121の打ち上げ、打ち下ろし方向に駆動する、自由度が1のアクチュエータである。また、本来複数枚あるべき羽根について、1枚の羽根だけの制御を例にして説明することにする。この羽121を昆虫の羽根と同様の運動をさせる手法を考える。なお、この羽ばたき飛行ロボットにおける羽ばたき飛行の態様等は羽根121の水平面に対してなす角度 θ の時系列データで表現することにする。

【0307】

一般的に、アクチュエータの駆動は、アクチュエータのパワー（駆動力の数値）の指定によって行なわれている。したがって、アクチュエータの駆動力モデルがない場合、羽根の変位を測定して、羽根の変位を駆動力モデルに変換する機構が必要になる。なぜなら、アクチュエータの駆動力（パワー）が一定であっても、羽根にかかる負荷により羽根の変位は異なるからである。たとえば、図36のアクチュエータ122の場合、羽根121の速度によって、流体より羽根121が受ける力が変化する等の理由により、羽根121をある姿勢に定位させる駆動力（パワー）は異なる。

【0308】

また、羽根の変位、すなわち、羽根の所定の位置の時系列データをフィードバックすることにより制御するタイプのアクチュエータは、その性質上、羽根が目標位置に到達する時刻以前に、羽根が目標位置に到達したときに必要とする駆動力（パワー）を得なければならないため、余分なエネルギーを必要とする。その結果、アクチュエータそのものの大きさが大きくなってしまう。

【0309】

また、アクチュエータ122の制御に必要なパワーは、流体と構造との連成によって決まるので、この方法では、羽根を駆動するのにどれだけのパワーが必要かが、羽根構造の実物を製造してから初めて判明する。そのため、アクチュエータのパワーにかなりのマージンを見込んでアクチュエータ122の仕様を決定する必要がある。このため、たとえば、高速度カメラから撮影した画像より求めた羽根121の運動を実現する駆動を、直接アクチュエータに行なわせると、アクチュエータのパワーにかなりのマージンを持たせる必要が生じる。

【0310】

逆に、アクチュエータ122の制御が、アクチュエータ122の発するパワー制御のみで可能ならば、必要かつ十分なパワーを有するアクチュエータを、必要かつ十分なエネルギーで駆動することができる。また、この場合、羽根にかかる負荷を含めて羽根を制御しているので、羽根にかかる負荷による制御のズレを調整するための制御を必要とない。

【0311】

そこで、上述の流体・構造連成数値モデルを利用すれば、直接アクチュエータ122を駆動すべきトルクが与えられるので、容易にアクチュエータ122の制御方法を作成することができる。

【0312】

この手法によれば、より軽量のアクチュエータおよびエネルギー供給源によって飛行することが可能になるため、この手法を適用することは羽ばたき飛行ロボットには極めて有用である。

【0313】

ただし、羽ばたき飛行ロボットに、羽根の位置を検出する装置を付加し、その装置から羽根の位置の時系列データをフィードバックさせることは、たとえば、駆動誤差の吸収に用いるために有用であるので、必ずしも羽ばたき飛行ロボットに羽根の位置を検出する装置を設けなくてもよいということではない。

【0314】

図36におけるアクチュエータ122にかかる電圧とトルクとの関係を、アク

チュエータ 1 2 2 に関して計測すれば、直接、制御に用いる電圧を決定することができる。そのため、アクチュエータドライブ回路 1 2 3 に発生させる信号を、制御装置 1 2 4 に内包しておき、制御の際には、この電圧を出力するように、制御装置 1 2 3 がアクチュエータドライブ回路 1 2 3 に信号を送信すれば、所望の羽ばたき制御が実現される。

【 0 3 1 5 】

(数値モデルをベースとした羽ばたき飛行ロボットの製造)

多くの場合、人間が製造したアクチュエータと、昆虫の筋肉には特性の違いがあり、昆虫の筋肉よる駆動と同一の駆動が最適な駆動であるとは限らない。

【 0 3 1 6 】

また、羽根 2 0 と等価な構造物を製造することは、実物の羽根の構造の複雑さを考慮すると、効率的ではない場合もある。

【 0 3 1 7 】

逆に、構造モデルや羽ばたき運動数値モデルを変更した場合に、駆動力モデルに与える影響が把握できるならば、トンボの羽根にトンボの羽ばたき方をさせる以外の羽ばたき飛行の態様の制御を導出することが可能になる。そのため、羽ばたき飛行ロボットのデザインや動作に多様な変更を加えることができる。

【 0 3 1 8 】

ここでは、感度解析と一般的に呼ばれる手法を応用して、上述のプロセスにより得られた個体 B の羽ばたき飛行の流体・構造連成数値モデルをベースとし、このベースの数値モデルを変形した羽根を有する羽ばたき飛行ロボットを製造する手法について説明する。

【 0 3 1 9 】

(各種感度解析について)

まず、羽根 1 3 1 の形状における感度解析について説明する。感度解析とは、羽 1 3 1 の形状に微妙な変更を加え、これを上記一連の流体・構造連成解析を行った結果の流体に関する数値モデルおよび構造に関する数値モデルと、形状に変更加える前の流体に関する数値モデルおよび構造に関する数値モデルとを比較することにより、感度すなわち羽根 1 8 1 の形状の変更に対するあるターゲット

パラメータの変化の度合を求めることである。言い換えれば、形状の数値モデルの変更により生じた所定の数値モデルの変化を求めることである。

【0320】

たとえば、図37における接点 P_t の z 座標を z_t から $z_t(1+\delta z)$ と変更した数値モデルを用い上記流体・構成連成解析を行なったところ、図37における羽131の支点反力の重力加速度方向成分 F_z が、 $F_z \times (1+\delta f)$ に変化したとすると、節点 P_t の z 座標の変更に対する支点反力の重力加速度成分の変化、すなわち、感度は $\delta f / \delta z$ と定義される。

【0321】

続いて、羽ばたき方、すなわち、羽ばたき飛行態様の感度解析について説明する。羽ばたき方の数値モデルは、時系列に変化する羽根の姿勢、すなわち、時系列的な羽根の位置データにより表わされる、時系列的な羽根の位置データに感度解析のための微妙な変更を加える。それにより、上記一連の流体・構造連成解析を行なった結果の羽ばたき方での流体に関する数値モデルおよび構造に関する数値モデルと、変更前の羽ばたき方での流体に関する数値モデルおよび構造に関する数値モデルとを比較する。それにより、感度、すなわち、羽ばたき方の数値モデルの変更に対する、あるターゲットパラメータの変化を求める。言い換えれば、羽ばたき方の数値モデルの変更により生じた特定の数値モデルの変化を求める。

【0322】

たとえば、図36における羽根121の振幅 θ_w を、 $\theta_w \times (1+\delta \theta)$ と変更した数値モデルを用い、上記流体・構造連成解析を行なったところ、図36における羽根121の支点反力の重力加速度方向成分 F_z が、 $F_z \times (1+\delta g)$ に変化したとすると、振幅 θ_w の変更に対する支点反力の重力加速度成分の変化、すなわち、感度は $\delta g / \delta \theta$ と定義される。

【0323】

これ以後、特に断らない限り、上記ターゲットパラメータとして、羽ばたき飛行にとって重要である、羽ばたき浮上力を採用することにする。より具体的にいうと、図36における羽根121の羽ばたき1周期あたりの羽根121の支点到

かかる重力加速度と反対の方向の力の平均値を、本実施の形態では特定ターゲットパラメータとする。この特定ターゲットパラメータの値が、正であれば、羽ばたき飛行ロボットは上昇し、負であれば、羽ばたき飛行ロボットは下降する。また、特定ターゲットパラメータの値がほぼゼロであれば、羽ばたき飛行ロボットはホバリングを行なう状態となる。そして、以後は、羽根の構造や羽ばたき方の変更前の羽根の実構造等価数値モデルを用いて作成された羽根の支点にかかる重力加速度と反対の方向の力の平均値の数値モデルと、羽根の構造や羽ばたき方の変更を行なった後の羽根の支点にかかる重力加速度と反対の方向の力の平均値の数値モデルとが等しくなる羽ばたき方を導出する手法について述べる。

【 0 3 2 4 】

(異なる形状の羽に対する羽ばたき方の導出)

まず、羽の形状を変更した際の羽ばたき方を求める手法について説明する。より具体的には、図 3 8 に示すように、流体・構造連成の数値モデルの作成に用いた実構造等価数値モデルと異なる人工の羽根 1 4 3 の数値モデルに対して、実構造等価数値モデルにおける羽ばたき浮上力と等しい羽ばたき浮上力を得ることのできる羽ばたき方を導出する手法について述べる。

【 0 3 2 5 】

上記の感度解析の説明においては、節点を個別に付加したが、あるパラメータに基づき、まとめて羽根の構造に関する数値モデルを変化させることで、このまとまった羽根の構造に関する数値モデルの変更に対する特定のパラメータの感度を求めることができる。例として、羽根のサイズを拡大、縮小した場合の羽ばたき態様の変化、すなわち、羽根の形状変化に対する羽ばたき浮上力の感度を求める場合が考えられる。たとえば、補間比率を $\delta 1$ として、羽根のサイズを $(1 + \delta 1)$ 倍した場合には、羽ばたき飛行ロボットの羽ばたき浮上力は $(1 + \delta 2)$ 倍になったとする。

【 0 3 2 6 】

また、羽ばたきの振幅 θw $(1 + \delta 3)$ 倍にした際には、羽ばたき飛行ロボットの羽ばたき浮上力が $(1 + \delta 4)$ 倍になったとする。この結果より、羽根のサイズを $(1 + \delta 1)$ 倍した場合には、羽ばたきの振幅 θw を、 $(1 - \delta 3 \times \delta 2$

／ $\delta 4$) 倍にすれば、羽根のサイズを変更する前と同等の羽ばたき浮上力を得ることができる。このように、羽根の形状の変化を1つのパラメータで置き換えて、この1つのパラメータの変更に対する浮上力の変化を求める方が、解析手法を簡略化することができる。

【0327】

この手法をさらに発展させ、羽根の実構造等価数値モデル141の構造を表わすパラメータ全体を、1つのパラメータによって変更する場合を考える。図38に示すように、人工の羽根143の構造(形状等)に関する数値モデルのパラメータを表わすパラメータ群 $M_m(i)$ と、先のトンボの実構造等価数値モデルの構造に関する数値モデルのパラメータを表わすパラメータ群 $M_n(i)$ とを定義する。

【0328】

ここで、補間により新たに作成した微小変化数値モデル、すなわち、補間構造数値モデル142のパラメータ群 $M_{b_new}(i)$ について、

$$M_{b_old}(i) = M_n(i)$$

$$M_{b_new}(i) = M_{b_old}(i) + \delta 5 \times (M_m(i) - M_n(i)) \dots (1)$$

とすれば、パラメータ $\delta 5$ を、補間比率と考えて、先の $\delta 1$ と同様に扱うことができる。すなわち、 $M_{b_new}(i)$ に対して、 $M_n(i)$ と同じ羽ばたき浮上力を得る羽ばたきの振幅 θw を求めることができる。

【0329】

さらに、解析の結果得られた $M_{b_new}(i)$ を新たに $M_{b_old}(i)$ として、再び、上記(1)式に戻って、各種感度解析とこれに基づいた羽ばたき振幅 θw の変更を繰り返す。

【0330】

これを繰返して、 $M_{b_new}(i)$ を更新し、それに応じて羽ばたきの振幅 θw を修正していくので、新たなモデル $M_m(i)$ における、元の実構造等価数値モデル $M_n(i)$ と等しい羽ばたき浮上の態様を実現する羽ばたきの振幅 θw が求まる。

【 0 3 3 1 】

さらに具体的には、たとえば、図 3 8 に示すように、人工の羽根 1 4 3 の構造数値モデルにおける別種の相対的な配置は実構造等価数値モデル 1 4 1 と同一として、ノードの位置と各メッシュの厚さ、およびヤング率のみを変更していく。それにより、実構造等価数値モデルを人工の羽根 1 4 3 の数値モデルに近づくように修正を加えていく。その結果、 $M_m(i)$ 、 $M_n(i)$ 、 $M_{b_old}(i)$ 、 $M_{b_new}(i)$ に含まれるパラメータは共通で、ノードの座標、ノードの姿勢、メッシュの厚さ、および、メッシュのヤング率とを並べたものとなる。なお、 $M_m(i)$ 等のパラメータ群についてはここで示したものが一例であり、これに限るものではない。

【 0 3 3 2 】

たとえば、精度は落ちるがメッシュの相対的位置関係が異なる場合においても、何らかの補間を用いることで、上記の手法を適用することが可能である。

【 0 3 3 3 】

また、 $M_m(i)$ などを、羽根の形状や剛性分布を表わす関数の係数群とすることも可能である。なお、ここに挙げた感度解析は、各パラメータの変化が線形であると想定できる、十分小さい δ に対して行なわれることが前提となる。

【 0 3 3 4 】

また、上記の説明においては説明の簡便のため、羽ばたき方の変更について羽ばたきの振幅 θ_w のみの説明をしたが、実際には羽ばたきの振幅 θ_w を変更することによって、羽ばたき浮上力以外の浮上を表わすパラメータも変化する。

【 0 3 3 5 】

よって、実際には、羽ばたき方を表わす各種のパラメータの、羽ばたき力（羽ばたき浮上力以外の羽ばたきに関する力：たとえば、羽ばたき浮上力とともに発生する推進力など）に対する感度を算出し、これを相殺する。すなわち、打消し合うような羽ばたきを表わすパラメータの組を、アクチュエータ 1 2 2 の特性も考慮に入れて、線形計画法などを用いて決定することになる。具体的には、羽ばたき方を表わす各種のパラメータとは、羽根の根元近傍のノードに与えられる時系列で表された位置データであり、羽ばたき浮上力は、本体構造における並進加

速度のデータおよび回転加速度データで表される。

【 0 3 3 6 】

（羽構造の最適化）

上述の項目では、人工の羽根 1 4 3 構造を目指して羽根の構造を変更し、これに伴い羽ばたき方を変更することで、人工の羽 1 4 3 構造における羽ばたき方を導出する手法について説明した。しかしながら、感度解析を用いることにより、ある仕様を満たすように実構造等価数値モデルに変更を加えていくことで、新たな羽根構造を導出して作成する手法も可能である。

【 0 3 3 7 】

つまり、ある羽ばたき飛行ロボットに求められている仕様に適した羽根の構造を作成することができる。たとえば、羽根の形状についてのみ説明すれば、羽根の各節点について、 x 、 y 、 z のそれぞれの方向の移動に対する、羽ばたき飛行の態様のパラメータの感度を算出し、このパラメータが最適な仕様に近づくよう、羽根の各節点を羽ばたき飛行の態様の感度に応じて移動させることを繰り返す。

【 0 3 3 8 】

より具体的な例として、羽ばたきによる浮上力を最大にしたい場合は、羽根の各節点の移動に対する羽ばたき浮上力の感度を求め、その感度が増加するように各節点をその感度に応じて微小量移動させる。たとえば、感度が負である節点については、負の方向に移動させる。なお、感度は非線形に変化していくので、形状の変更のために感度解析を改めて行なう必要がある。また、上述のように羽根の特性を縮尺したパラメータを用いて感度解析を行なう手法も可能である。たとえば、ある羽ばたき周波数においてある羽ばたき浮上力を得ることのできる羽根の元の羽根に対する拡大比率を算出し、羽根構造を作成する場合等が考えられる。

【 0 3 3 9 】

（羽ばたき方の最適化）

上述の感度解析は、羽ばたき飛行ロボットの羽ばたき飛行態様の制御方法を最適化するために単独に用いることができる。

【 0 3 4 0 】

たとえば、図 3 5 に示すように、昆虫の羽ばたきにおける浮上力には変動が大きい場合がある。これを、感度解析に基づき、羽根の姿勢、すなわち、羽根の位置の時系列のデータを変更をすることにより、羽ばたき浮上力を維持したままで、より変動の少ない羽ばたき方を導出することが可能である。このようにして、人工物に対応する要求仕様に基づいた制御方法を作成することが可能である。

【 0 3 4 1 】

さらに、羽ばたきロボットに所定の羽ばたき運動態様をもたらす羽ばたき駆動態様の数値モデルを作成する手法も考えられる。これは、羽根の駆動態様を表わすパラメータ $W(i)$ について、 $W(i)$ の変更に対する、羽ばたき飛行ロボットの運動態様の変化についての感度解析を行ない、解析結果に基づいて、羽ばたき駆動態様を変更していくことで行なわれる。

【 0 3 4 2 】

このように、羽ばたき駆動態様の数値モデルを作成する手法であれば、浮上する条件を満たしていない羽ばたき駆動態様の数値モデルであっても、容易に、羽ばたき駆動態様の数値モデルの性質を調べることができる。たとえば、羽ばたき飛行ロボットが右旋回をする場合、従来の、実験による手法では、浮上させている状態の中で、右旋回の可能な羽ばたき駆動態様を調べていく必要があった。しかしながら、本実施の形態の流体・構造連成解析により作成された羽ばたき駆動態様の数値モデルを用いた手法では、まず、右旋回する羽ばたき駆動態様の数値モデルを作成し、その後で、右旋回する羽ばたき駆動態様を行なうことに起因した浮上力の変化を補償するように、この羽ばたき駆動態様の数値モデルを変更していくという手法を採用することができる。

【 0 3 4 3 】

(アクチュエータ駆動の最適化)

上述の議論と同様に、アクチュエータの駆動についても変更を行なうことができる。たとえば、アクチュエータ 1 2 2 の応答が高周波数帯域で悪くなる場合など、ある一定以上の周波数でのアクチュエータ 1 2 2 の駆動を行ないたくない場合に、アクチュエータ 1 2 2 の駆動に要求される駆動周波数を、羽根の構造の変更により低くする手法を例として説明する。

【0344】

高速度カメラにおける1秒当りの画像取得枚数、すなわち、サンプリング周波数を $2 \times f_c$ とおくと、羽根121の駆動に関しては最も高い制御周波数は f_c である。ここで、まず、羽ばたき方に関して $f_c \times (1 - \delta_c)$ になる周波数にてローパスフィルタリングを行なう。このように定まった羽ばたき方に基づき上述の流体・構造連成解析を行なう。さらに、フィルタリング周波数の変更に対する、羽ばたき浮上力の感度を算出する。また、上述の羽121の形状の変更による、羽ばたき浮上力の感度を算出する。

【0345】

これらの感度により、フィルタリング周波数の変更によって起きる羽ばたき浮上力の変化を補うことができる、羽根121の変更された形状を導出することができる。

【0346】

(羽ばたき飛行ロボットの製造)

上述の感度解析を用いる手法を組合せることにより、羽121の形状が実構造等価数値モデルと異なる羽ばたき飛行ロボットについても、前述の数値モデルをベースとした、同様の羽ばたき浮上力を得られる羽ばたき方を導出して作成することが可能である。

【0347】

また、アクチュエータの駆動特性を考慮した羽根構造とその制御方法を作成することも可能である。なお、ここに示した流体・構造連成数値モデルのみならず、神経系モデルや筋肉の駆動モデル、昆虫の情報処理モデルについても、同様の手法を用いて、昆虫の当該数値モデルをベースとして人工物の仕様に基づいた新たな数値モデルを作成して、この数値モデルに基づいた羽ばたき飛行ロボットを製造することが可能である。これらの羽ばたき飛行ロボットの製造の手順をまとめて図25に示す。

【0348】

(その他)

(モデリング手順について)

トンボなどの羽根は、種が同じであれば、個体差はあるものの、概ね同一形状をしている。また、羽根は非常に複雑な形状をしており、それゆえに構造や剛性の緻密なモデリングには非常に時間がかかると考えられる。

【 0 3 4 9 】

なお、本実施の形態の流体・構造連性解析においては、羽根の構造や運動態様の最適化手法として、最も明示的である感度解析という手段を用いたが、最適化手法としての別の手法を用いる手法も可能である。他の有効な手法として、ニューラルネットワークを用いた学習を用いる手法や、遺伝アルゴリズムを用いた最適化を行なう手法が挙げられる。

【 0 3 5 0 】

たとえば、遺伝アルゴリズムを用いて羽根の設計を最適化する手法においては、まず、前述の各羽根の構造の数値モデルを表わすパラメータ群 $M(i)$ の各要素を遺伝子としてコーディングを行なう。これにより表わされる羽根の構造の数値モデルが、空气中で所定の運動をする場合の流体・構造連性解析を行なう。これにより得られた結果を、たとえば、浮上力の大小といった、何らかの評価関数によってその良否を評価する。その評価に基づいて、よい構造の遺伝子をもつ数値モデル同士を掛け合わせる（組合せる）というプロセスを繰返すことで、最適な構造に近い羽根の構造の数値モデルが作成される。

【 0 3 5 1 】

また、この遺伝アルゴリズムを用いる手法は羽ばたき運動態様の数値モデルの作成にも応用することができる。すなわち、その一例として、羽根の運動を表わすパラメータを $W(i)$ とおき、この $W(i)$ に関して、前述の $M(i)$ と同様に遺伝アルゴリズムを適用する手法がある。その手法においては、まず、たとえば、羽根の水平面に対する角度を表わす関数 w 、羽ばたきの 1 周期にかかる時間を T 、 $\omega = 2 \times \pi / T$ 、最大サンプリング周波数を f_c 、 n を $0 \leq n \leq T / f_c$ とする整数とする。このとき、羽根の運動を表わすパラメータを $W(i)$ を、周波数成分ごとに、 $w = A(n) \times \sin(n \times \omega \times t) + B(n) \times \cos(n \times \omega \times t)$ という式に分解した際の、各運動を表わすパラメータ w に対する $A(n)$ 、 $B(n)$ の集合を羽根の運動態様の数値モデルとする手法が挙げられる。

【0352】

ところが、羽根は生体より切離されると急速に水分を失い、剛性が変化してしまう。また、同様の理由から、計測を行なっている期間中は、トンボの生理状態を維持する必要がある。

【0353】

また、環境保護の観点から、データを採取したトンボは、計測終了後、自然に帰すことが望ましいとともに、計測中は昆虫の生理状態を維持する必要があり、計測に時間がかかる場合や、えさや水を与えることや、気温や湿度の管理などかなりの設備と手間が必要になる。

【0354】

これらの理由により、羽根の剛性測定はトンボを損壊せずに行なうことが望ましいが、羽根を分解しないと、緻密な形状や剛性の計測を行なうことが困難となる。そこで、本実施の形態の羽ばたき飛行ロボットの製造方法においては、羽根の緻密な計測に用いる個体と、羽根の駆動の計測に用いる個体とを別に分けることでこれを解決している。なお、上記条件を完全に満たすことを必要としなければ、他の手法を用いて羽根と羽ばたき方のモデリングを行なうことは可能である。

【0355】

たとえば、これらの測定が昆虫の測定上の寿命に対して十分短時間に行なえるなら、各個体に対して個別に羽根の実構造等価数値モデルを作成することが可能なので、これらの一連の羽根の基準構造数値モデルの作成のためのプロセスは必須ではない。

【0356】

（流体・構造連成解析の手法について）

流体・構造連成解析には複数の種類の提案がなされている。

【0357】

最も単純な手法として、高速度カメラにより撮影された羽根の映像より、流体のみについて移動境界問題を解くことによって流速を決定する手法が考えられる。また、羽根の構造は単独で変形を与えて解析することができる。

【0358】

しかしながら、この手法においては、羽根のすべての部位（点）の移動を、すべての解析ステップにおいて計測する必要があり、データ量は膨大なものとなる。また、羽ばたき飛行の結果の解析に留まるため、上述の羽ばたき飛行ロボットなどの応用に用いることはできない。

【0359】

流体と構造の相互依存を持った問題を解く手法として、流体と構造の支配方程式を交互に計算する弱連成法や流体と構造を含めた系全体の方程式（連成系方程式）を一挙（同時）に計算する強連成法が提案されている。前述した張群らによれば、本実施の形態のような流体・構造相互の依存性が強い問題に関しては、強連成法を用いることが最も効率的で最適であるとしている。

【0360】

なお、前述した張群らの流体・構造連成構造解析は、生体以外の構造物についてなされたものであり、本実施の形態の流体・構造連成構造解析は、空気中での昆虫の羽ばたき運動を例とした生体の挙動についてなされたものである。このように生体に流体・構造連成構造解析を適用することにより、その生体を模倣したロボットを製造することが容易になることが本発明の特徴である。

【0361】

次に、表7および図45～図50を用いて、実施の形態2の流体・構造連成数値モデルの作成方法を説明する。

【0362】

本実施の形態の流体・構造連成数値モデルの作成方法において用いられる構造の数値モデルは、図28に示す実施の形態1の流体・構造連成数値モデルの作成方法において用いられる構造の数値モデルの羽根の厚さが0.35mm、0.18mm、0.15mm、0.12mm、0.1mm、0.05mmである部分が、それぞれ、0.045mm、0.012mm、0.010mm、0.008mm、0.006mm、0.004mmに置き換えられている。

【0363】

また、実施の形態1の流体・構造連成数値モデルの作成方法においては、浮上力の発生する方向は、図41において、y軸正方向であったが、本実施の形態の

流体・構造連成数値モデルの作成方法においては、 y 軸負方向である。ただし、浮上力は垂直上向きを正とする。

【 0 3 6 4 】

また、本実施の形態の流体・構造連成数値モデルの作成方法においては、実施の形態 1 の流体・構造連成数値モデルの作成方法において使用した図 3 2 および図 3 3 のメッシュ構造が、図 4 5 および図 4 6 に示すメッシュ構造に置き換えられている。

【 0 3 6 5 】

また、本実施の形態の流体・構造連成数値モデルの作成方法においては、実施の形態 1 の流体・構造連成数値モデルの作成方法において得られた図 3 5 に示す浮上力と時刻との関係が、図 4 7 に示すような関係になっている。

【 0 3 6 6 】

また、本実施の形態の流体・構造連成数値モデルの作成方法においては、実施の形態 1 の流体・構造連成数値モデルの作成方法において得られた図 4 2 および図 4 3 に示す位置と時間との関係が、図 4 8 および図 4 9 に示す関係になっている。

【 0 3 6 7 】

また、本実施の形態の流体・構造連成数値モデルの作成方法においては、実施の形態 1 の流体・構造連成数値モデルの作成方法において得られた図 4 4 に示すトルクと時刻との関係が、図 5 0 に示すような関係になっている。ただし、図 5 0 において、 T_{θ} は θ 方向の駆動を行うためのトルクを示し、 T_{β} は β 方向の駆動を行うためのトルクを示している。

【 0 3 6 8 】

本実施の形態の流体・構造連成数値モデルの作成方法においては、実施の形態 1 の流体・構造連成数値モデルの作成方法で使用した表 1 の Node83 の x 座標値の 0. 0 0 1 が 0. 0 0 0 8 8 9 に置き換えられており、 y 座標値の 0. 0 0 1 が 0. 0 0 0 8 8 9 に置き換えられている。

【 0 3 6 9 】

また、本実施の形態の流体・構造連成数値モデルの作成方法においては、実施

の形態 1 の流体・構造連成数値モデルの作成方法で使した表 4 のヤング率 1.00×10^9 が 0.5×10^9 に置き換えられており、比重 1.2×10^3 が 0.7×10^3 に置き換えられており、厚さ 0.35 が 4.5×10^{-5} に置き換えられている。

【0370】

また、ShellMotion.dat において、羽根の節点における x 、 y 、 z 座標の時刻歴は、表 6 の代わりに表 7 に示すようになる。

【0371】

【表 7】

ShellMotion.dat

Node/Time(sec)	0	0.00003	0.00006	0.00009	...	0.121
Node71_x	0	0	0	0	...	0
Node71_y	0	0	0	0	...	0
Node71_z	0	0	0	0	...	0
Node83_x	0.000889	0.000889	0.000889	0.000889	...	0.000874
Node83_y	0	1.15×10^{-7}	4.56×10^{-7}	1.02×10^{-6}	...	-6.5×10^{-5}
Node83_z	0	9.04×10^{-8}	3.59×10^{-7}	8.02×10^{-7}	...	0.000148
Node337_x	0	-1.1×10^{-7}	-4.6×10^{-7}	-1×10^{-6}	...	0.000155
Node337_y	0.000889	0.000889	0.000889	0.000889	...	0.00056
Node337_z	0	-1.6×10^{-7}	-6.4×10^{-7}	-1.4×10^{-6}	...	-0.00067

【0372】

また、本実施の形態の流体・構造連成数値モデルの作成方法において用いられる構成および手法は、その他の図および表においては、実施の形態 1 の流体・構造連成数値モデルの作成方法と同様である。

【0373】

(本実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の製造方法の特徴およびその効果)

本実施の形態の浮上移動装置 (90) の製造方法は、昆虫の羽の実物の構造に関する物理量を測定する羽構造測定ステップと、羽構造測定ステップにおいて測定された前記羽の実物の構造に関する物理量が数値化され、羽の実物と等価とみなすことができる羽構造等価数値モデルを作成する羽構造等価数値モデル作成ス

テップとを備えている。

【 0 3 7 4 】

また、本実施の形態の浮上移動装置（90）の製造方法は、羽構造等価数値モデルの剛性のパラメータが変更された複数種類の羽構造数値モデルを作成する羽構造数値モデル変更ステップと、昆虫の羽の実物に羽ばたき運動をさせて、羽ばたき運動の態様に関する物理量を測定する羽ばたき運動態様測定ステップと、羽ばたき運動の態様に関する物理量が数値化された羽ばたき運動数値モデルを作成する羽ばたき運動数値モデル作成ステップとを備えている。

【 0 3 7 5 】

また、本実施の形態の浮上移動装置（90）の製造方法は、予め設定された解析のための仮想流体内において、複数種類の羽構造数値モデルそれぞれに、羽ばたき運動数値モデルで表わされる前記羽ばたき運動を行なわせた際の、仮想流体の流体に関する数値モデルおよび羽構造数値モデルの構造に関する数値モデルそれぞれを、流体の挙動と構造物の挙動との相互作用を含めて数値モデル化する流体・構造連成解析を行なうことにより算出する流体・構造連成解析ステップを備えている。

【 0 3 7 6 】

本実施の形態の浮上移動装置（90）の製造方法は、複数種類の羽構造数値モデルのうち、流体・構造連成解析ステップにより得られた仮想流体の流体に関する数値モデルおよび羽構造数値モデルの構造に関する数値モデルそれぞれのうちの所定のパラメータの値が最も優れた値である羽構造数値モデルを用いて、駆動装置により駆動される羽部を製造する羽部製造ステップを備えている。

【 0 3 7 7 】

前述の製法によれば、変形の影響を定量化された羽部を有する浮上移動装置を製造することができる。

【 0 3 7 8 】

本実施の形態の浮上移動装置（90）の製造方法は、所定のパラメータが、羽構造数値モデルを羽ばたき運動させたときに羽部（904）に生じる浮上力であってもよい。

【 0 3 7 9 】

この製法によれば、羽ばたき運動により、最大の浮上力を生じさせることができる羽部（ 9 0 4 ）を有する浮上移動装置（ 9 0 ）を製造することができる。

【 0 3 8 0 】

本実施の形態の浮上移動装置（ 9 0 ）は、所定のパラメータが、羽構造数値モデルを羽ばたき運動させたときに羽部（ 9 0 4 ）に生じる浮上力を羽部（ 9 0 4 ）の駆動に必要なトルクで除算した値であってもよい。

【 0 3 8 1 】

この製法によれば、羽ばたき運動に用いるエネルギーを最も小さくすることができる羽部（ 9 0 4 ）を製造することができる。そのため、例えば、同一の浮上力を生じさせる場合であっても、よりエネルギー源部が小型化された浮上移動装置（ 9 0 ）を製造することが可能になる。

【 0 3 8 2 】

なお、本実施の形態の羽ばたき浮上移動装置（ 9 0 ）の製造方法においては、羽ばたき運動に用いるエネルギーとは、特に断らない限り、羽部（ 9 0 4 ）を駆動させる駆動部（ 9 0 5 ）において消費されたエネルギーである。エネルギーの代表例としては、駆動部（ 9 0 5 ）の消費電力が挙げられる。

【 0 3 8 3 】

また、前述の所定のパラメータが、羽構造数値モデルを羽ばたき運動させたときに羽部（ 9 0 4 ）に生じる浮上力を、浮上力を生じさせるときの羽部（ 9 0 4 ）の羽ばたきの周波数で除算した値であってもよい。

【 0 3 8 4 】

この製法によれば、駆動周波数の上限が最も小さい駆動部を用いることができる。したがって、剛性が低いため駆動周波数を大きくできない、軽量の駆動部を用いることができる。そのため、浮上により有利な羽ばたき浮上移動装置（ 9 0 ）を製造することが可能になる。

【 0 3 8 5 】

また、所定のパラメータが、羽構造数値モデルを羽ばたき運動させたときに羽部に生じる浮上力を、該浮上力を生じさせるために必要なエネルギーで除算した

値であってもよい。

【0386】

この製法によれば、浮上力の絶対値、トルクに対する浮上力の効率、および羽部（90）の駆動エネルギーに対する浮上力の効率を最適値の1/2より劣化させることなく羽ばたくことができる浮上移動装置を製造することができる。

【0387】

次に、本実施の形態の羽ばたき浮上移動装置（90）の参考例の実施の形態1および2の羽ばたき浮上移動装置について説明する。

【0388】

まず、実施の形態1に羽ばたき浮上移動について説明する。図51（a）および図51（b）は、羽部として2本の羽軸を有する羽ばたき装置を示す図である。図51（a）では、羽ばたき装置の前方正面部分が示され、図51（b）では、羽ばたき装置の前方正面に向かって左側面部分が示されている。

【0389】

なお、図51（a）および図51（b）では羽ばたき装置の前方正面に向かって左羽しか示されていないが、実際には、胴体部105の中心軸を挟んで左右対称に右羽も形成されている。また、説明を簡単にするため、胴体部105が延びる方向に沿った軸（胴体軸801）は水平面内にあり、重心を通る中心軸802は鉛直方向に保たれているとする。

【0390】

図51（a）および図51（b）に示すように、羽ばたき装置の胴体部105には、前羽軸103および後羽軸104と、その前羽軸103と後羽軸104との間を渡すように設けられた羽の膜106とを有する羽（左羽）が形成されている。

【0391】

また、胴体部105には、前羽軸103を駆動するための回転型アクチュエータ101と後羽軸104を駆動するための回転型アクチュエータ102とが搭載されている。このようなアクチュエータ101、102の配置や前羽軸103、後羽軸104および羽の膜106を含む羽の形状は、飛行の性能が損なわれない

ならばこれに限られるものではない。

【0392】

さらに、この羽ばたき装置の場合、羽の断面形状を鉛直上方に凸となるようにしておけば、水平方向への飛行に際して抗力だけでなく揚力も発生して、より大きな浮上力が得られることになる。

【0393】

また、この羽ばたき装置の重心の位置は、羽ばたき装置の安定性を重視するために羽が周囲の流体により受ける力のアクチュエータに対する作用点の位置よりも下方になるように設定されている。一方、羽ばたき装置の姿勢を容易に変更する観点からは重心とその作用点を略一致させておくことが望ましく、この場合には、姿勢制御に必要な左右の羽が流体から受ける力の差が小さくなって、羽ばたき装置の姿勢変更を容易に行うことができる。

【0394】

2つの回転型アクチュエータ101、102は互いに回転軸800を共有している。この回転軸800は胴体軸とは所定の角度($90^\circ - \theta$)をなしている。前(後)羽軸103、104はアクチュエータ101、102を支点として回転軸800と直交する平面内を往復運動する。この回転軸800と直交する平面と胴体軸801とのなす角度が仰角 θ となる。

【0395】

胴体部105としては、機械的強度を確保するとともに、十分な軽量化を図るために、ポリエチレンテレフタレート(PET)などを円筒状に成形したものが望ましいが、このような材料や形状に限定されるものではない。

【0396】

アクチュエータ101、102としては、起動トルクが大きいこと、往復運動が簡単に実現できること、構造が単純なことなどから、圧電素子(ピエゾ)を用いた超音波進行波アクチュエータを用いるのが望ましい。これには、回転型アクチュエータとリニア型アクチュエータとの2つの種類がある。図51(a)および図51(b)では、回転型アクチュエータが用いられている。

【0397】

ここでは、進行波を用いた超音波素子によって羽を直接駆動する方法を中心に説明するが、この羽を駆動するための機構や、それに用いるアクチュエータの種類については特に本実施の形態に示したものに限られない。

【0398】

回転型アクチュエータとしては、図51(a)および図51(b)に示された回転型アクチュエータ101、102の他に、たとえば図61に示される回転型アクチュエータ401を用いてもよい。

【0399】

図61に示された羽ばたき装置では、胴体部404に搭載された回転型アクチュエータ401に羽403が取付けられている。羽403は回転型アクチュエータ401の回転軸402を中心として往復運動をする。

【0400】

また、羽を駆動するための機構としては、特開平5-1695675号公報に記載されているような外骨格構造とリニアアクチュエータを組合わせた機構を適用して、たとえば図62または図63に示すような羽ばたき装置を構成してもよい。

【0401】

図62に示された羽ばたき装置では、リニアアクチュエータ501の一端に、前羽軸または後羽軸503が接続されている。胴体部504に装着されたヒンジ502を介してリニアアクチュエータ501の運動が前羽軸または後羽軸503に伝えられることで羽ばたき運動が行われる。この羽ばたき運動は、羽を直接筋肉で駆動するトンボの羽ばたき運動にヒントを得たものである。

【0402】

図63に示された羽ばたき装置では、胴体部は上面胴体部603と下面胴体部604に分けられている。下面胴体部604に固定されたリニアアクチュエータ601の運動が上面胴体部603に伝えられる。そして、その上面胴体部603の運動がヒンジ602を介して前羽軸または後羽軸603に伝えられることで羽ばたき運動が行われる。この羽ばたき運動は、トンボ以外のハチなどが用いている羽ばたき運動にヒントを得たものである。

【0403】

図63に示す羽ばたき装置の場合、1つのアクチュエータ601によって左右の羽軸603が同時に駆動されるため、左右の羽軸を別々に駆動することができず、細かな飛行制御を行うことはできないが、アクチュエータの数を減らすことができ、軽量化および消費電力の低減を図ることが可能である。

【0404】

さて、図51(a)および図51(b)に示された羽ばたき装置では、回転型アクチュエータ101、102には前羽軸103と後羽軸104とがそれぞれ接続されている。前羽軸103と後羽軸104の間には羽の膜106が張られている。羽の膜106はその面内において収縮する方向に自発的な張力を有しており、羽全体の剛性を高める働きをしている。

【0405】

軽量化のため前羽軸103と後羽軸104は中空構造であり、それぞれカーボングラファイトから形成されている。このため、前羽軸103と後羽軸104には弾力性があり、前羽軸103と後羽軸104とは羽の膜106の張力により変形可能である。

【0406】

図64は本羽ばたき装置の全体の構造を示す図である。なお、前方方向（紙面に向かって上）に向かって左側の羽は省略されている。

【0407】

胴体部700には、超音波センサ701、赤外線センサ702、加速度センサ703および角加速度センサ704が配されている。これらのセンサによる検出結果は羽ばたき制御部705に送られる。羽ばたき制御部705では、超音波センサ701や赤外線センサ702によって検出された結果から羽ばたき装置と周囲の障害物や人間との距離などの情報が処理される。また、加速度センサ703や角加速度センサ704によって検知された結果から、羽ばたき装置の浮上状態、目的位置または姿勢などの情報が処理されて、左右のアクチュエータ706および重心制御部707の駆動制御が決定される。

【0408】

なお、ここでは、本羽ばたき装置の周囲に存在する障害物を検出する手段として超音波センサ 7 0 1 および赤外線センサ 7 0 2 を用い、本羽ばたき装置の位置および姿勢を検出する手段として加速度センサ 7 0 3 および角加速度センサ 7 0 4 を用いたが、本羽ばたき装置の周囲環境や位置と姿勢が計測可能なセンサであれば、上記センサに限られない。

【 0 4 0 9 】

たとえば、直交する 3 軸方向の加速度を測定可能な加速度センサ 2 つをそれぞれ胴体部 7 0 0 の異なる位置に配して得られる加速度情報からも、本羽ばたき装置の姿勢を算出することは可能である。また、本羽ばたき装置が移動する空間内に磁場分布を設けておき、磁気センサによってこの磁場分布を検知することで本羽ばたき装置の位置と姿勢を算出することも可能である。

【 0 4 1 0 】

また、図 6 4 では、加速度センサ 7 0 3 および角加速度センサ 7 0 4 をはじめとするセンサ類は、羽ばたき制御部 7 0 5 とは別部品として示されているが、軽量化の観点から、たとえばマイクロマシニング技術により羽ばたき制御部 7 0 5 と一体で同一基板上に形成してもよい。

【 0 4 1 1 】

また、本羽ばたき装置では羽の駆動をオープンループ制御としているが、羽の付け根に羽の角度センサを設け、この角度センサから得られる角度情報によりクローズドループ制御を行なうことも可能である。

【 0 4 1 2 】

なお、浮上する空間における流体の流れが既知であり、予め定められた羽ばたき方法によって浮上することが可能ならば、ここに挙げたセンサ類は必須ではない。

【 0 4 1 3 】

羽ばたき制御部 7 0 5 はメモリ部 7 0 8 と接続されており、羽ばたき制御に必要な既存のデータをメモリ部 7 0 8 から読出すことができる。また、各センサ 7 0 1 ~ 7 0 4 によって得られた情報をメモリ部 7 0 8 に送込み、必要に応じてメモリ部 7 0 8 の情報を書換えることもでき、羽ばたき装置として学習機能を持た

せることができる。

【0414】

なお、各センサ701～704によって得られた情報をメモリ部708に蓄積するだけであれば、羽ばたき制御部705を介さずにメモリ部708と各センサ701～704とが直接接続されていてもよい。また、羽ばたき制御部705は通信制御部709と接続されて、通信制御部709とデータの入出力を行うことができる。通信制御部709は、アンテナ部710を介して外部の装置（他の羽ばたき装置やベースステーションなど）とのデータの送受信を行う。

【0415】

このような通信機能により、羽ばたき装置が取得してメモリ部708に蓄えられたデータを速やかに外部の装置に転送することができる。また、羽ばたき装置では入手できない情報を外部の装置から受取り、そのような情報をメモリ部708に蓄積することで、羽ばたきの制御に利用することもできる。たとえば、大きなマップ情報のすべてを羽ばたき装置に記憶させなくても、随時、必要な範囲のマップ情報をベースステーションなどから入手することなどが可能となる。

【0416】

なお、図64では、アンテナ部710は胴体部700の端から突き出た棒状のものとして示されているが、アンテナの機能を有するものであれば、形状、配置などこれに限られない。たとえば、前羽軸712や後羽軸713を利用して、羽の上にループ状のアンテナを形成してもよい。また、胴体部700にアンテナを内蔵した形態でも、あるいは、アンテナと通信制御部709とを一体化させた形態でもよい。

【0417】

超音波センサ701、赤外線センサ702、加速度センサ703、角加速度センサ704、羽ばたき制御部705、左右のアクチュエータ706、重心制御部707、メモリ部708、通信制御部709およびアンテナ部710などは、電源部711により供給される電流によって駆動される。

【0418】

ここでは、駆動エネルギーとして電力を用いたが、内燃機関を用いることも可

能である。また、昆虫の筋肉に見られるような、生理的酸化還元反応を用いたアクチュエータを用いることも可能である。あるいは、アクチュエータの駆動エネルギーを外部から取得する方法も採用できる。たとえば、電力については熱電素子、電磁波などが挙げられる。

【0419】

(浮上方法)

説明の簡便のため、本羽ばたき装置に作用する外力は、羽が流体から受ける流体力と羽ばたき装置に作用する重力（羽ばたき装置の質量と重力加速度との積）のみであるとする。本羽ばたき装置が恒常的に浮上するためには1回の羽ばたき動作の間の時間平均において、次の関係、

（羽に作用する鉛直上方向の流体力）＞（本羽ばたき装置に作用する重力）を満たすことが必要とされる。1回の羽ばたき動作とは、羽を打ち下ろし次に羽を打ち上げる動作をいう。

【0420】

さらに、鉛直上向きの流体力を卓越させて上昇させるためには、

（打ち下ろし動作において羽に作用する鉛直上向きの流体力）＞（打ち上げ動作において羽に作用する鉛直下向きの流体力）となる必要がある。

【0421】

ここでは、昆虫の羽ばたき方を単純化した羽ばたき方法により、打ち下ろし動作において羽に作用する鉛直上向きの流体力（以下「打ち下ろし時の流体力」と記す。）を、打ち上げ動作において羽に作用する鉛直下向きの流体力（以下「打ち上げ時の流体力」と記す。）より大きくする方法について説明する。

【0422】

説明の簡便のため、流体の挙動もしくは流体が羽に及ぼす力については、その主要成分を挙げて説明する。また、この羽ばたき方法により得られる浮上力と、本羽ばたき装置に作用する重力（以下「重量」と記す。）の大小については後述する。

【0423】

打ち下ろし時の流体力を打ち上げ時の流体力よりも大きくするためには、打ち下ろし時に羽の膜 1 0 6 が移動する空間の体積が最大になるように打ち下ろせばよい。そのためには、羽の膜 1 0 6 を水平面と略平行に打ち下ろせばよく、これにより、ほぼ最大の流体力を得ることができる。

【 0 4 2 4 】

反対に、打ち上げ時には羽の膜 1 0 6 が移動する空間の体積が最小になるように打ち上げればよい。そのためには、羽の膜 1 0 6 を水平面に対して略直角に近い角度で打ち上げればよく、これにより、羽に及ぼされる流体力はほぼ最小となる。

【 0 4 2 5 】

そこで、回転型アクチュエータ 1 0 1、1 0 2 により回転軸 8 0 0 の周りに両羽軸 1 0 3、1 0 4 を往復運動させる際に、各羽軸 1 0 3、1 0 4 が水平面と略一致する位置を中心として上方と下方とにそれぞれ角度 γ だけ往復運動させるとする。さらに、図 5 2 に示すように、前羽軸 1 0 3 の往復運動に対して後羽軸 1 0 4 の往復運動を適当な位相 ϕ だけ遅れさせる。

【 0 4 2 6 】

これにより、図 5 3 ～図 6 0（ここでは $\phi = 20^\circ$ として描いた）に示す一連の羽の往復運動のうち、図 5 3 ～図 5 7 に示された打ち下ろし時においては、より高い位置にある回転型アクチュエータ 3 0 1 の前羽軸 3 0 3 が先に打ち下ろされるため、前羽軸 3 0 3 および後羽軸 3 0 4 の先端と羽の膜 3 0 6 が水平に近づく。

【 0 4 2 7 】

一方、図 5 7 ～図 6 0 に示された打ち上げ時においては、両羽軸 3 0 3、3 0 4 の先端の高さの差が拡大されて、羽の膜 3 0 6 も垂直に近づく。この結果、前羽軸 3 0 3 と後羽軸 3 0 4 に張られた羽の膜 3 0 6 が流体を押し下げ、あるいは、押し上げる量に差異が生じ、この羽ばたき装置の場合には、打ち下ろし時の流体力の方が打ち上げ時の流体力よりも大きくなって浮上力が得られることになる。

【 0 4 2 8 】

この浮上力のベクトルは、位相差 ϕ を変化させることにより前後に傾く。前方に傾けば推進運動、後方に傾けば後退運動、真上に向けば停空飛翔（ホバリング）状態となる。なお、実際の飛行では、位相差 ϕ 以外にも、羽ばたき周波数 f や羽ばたき角 γ を制御することが可能である。また、この羽ばたき装置では、羽ばたき仰角 θ を固定しているが、これを変化させる機能を追加して、自由度を増やしても構わない。

【0429】

（羽ばたき制御）

実際の羽ばたき制御についてさらに詳細に説明する。上述した羽ばたき装置では、打ち下ろし動作または打ち上げ動作の際に、羽の先端部がなす捻り角 α は、羽の長さ（羽の膜の前羽軸および後羽軸に沿った長さ）を l 、羽の幅（前羽軸と後羽軸の間隔）を w 、羽ばたき角を γ 、羽ばたき運動の位相を τ （最も打ち上げた瞬間を 0° 、最も打ち下ろした瞬間を 180° とする）、前羽軸と後羽軸の位相差を ϕ とすれば（図53、図59、図60を参照）、およそ以下の式で表わされる。

【0430】

$$\tan \alpha = (w/l) \cdot [\sin(\gamma \cdot \cos \tau) - \sin\{\gamma \cdot \cos(\tau + \phi)\}]$$

実際には、前羽軸や後羽軸には弾性があり変形可能であるので、この捻り角 α は多少違った値をとる。また、羽軸の根元ほどこの角度は小さい。しかし、以下の議論では簡便のため、上の式の α を用いて説明する。

【0431】

捻りを加えていない羽に作用する流体力の鉛直方向成分 F は、流体の密度を ρ 、羽ばたき角を γ 、羽ばたき周波数を f として、およそ

$$F = (4/3) \cdot \pi^2 \rho w \gamma^2 f^2 l^3 \cdot \sin^2 \tau \cdot \cos(\gamma \cdot \cos \tau)$$

となる。なお、羽に作用する流体力の水平方向成分は、左右の羽が同じ運動をすれば互いに打ち消し合うことになる。

【0432】

羽に捻り角 α をもたせると、上記成分 F の羽ばたき運動平面に垂直な成分 L と

、水平な成分Dはそれぞれ次のようになる。

【0433】

$$L = F \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha$$

$$D = F \cdot \cos^2 \alpha$$

これに、羽ばたき仰角 θ を考慮すると、重量と釣り合うべき鉛直方向の成分Aと、前後運動の推力となる水平方向成分Jは、打ち下ろし時では、

$$A \downarrow = -L \cdot \cos \theta + D \cdot \sin \theta$$

$$J \downarrow = -L \cdot \sin \theta - D \cdot \cos \theta$$

打ち上げ時では、

$$A \uparrow = L \cdot \cos \theta - D \cdot \sin \theta$$

$$J \uparrow = L \cdot \sin \theta + D \cdot \cos \theta$$

となる。実際の浮力や推進力は、羽ばたき運動の1周期分を積分したものとなる。

【0434】

以上より、この飛行制御の一例として、羽ばたき装置の羽の長さ $l = 4 \text{ cm}$ 、羽の幅 $w = 1 \text{ cm}$ 、羽ばたき仰角 $\theta = 30^\circ$ 、羽ばたき角 $\gamma = 60^\circ$ 、羽ばたき周波数 $f = 50 \text{ Hz}$ 、打ち下ろし時の位相差 $\phi \downarrow = 4^\circ$ 、打ち上げ時の位相差 $\phi \uparrow = 16^\circ$ とした場合における鉛直方向成分Aと水平方向成分Jの時間変化を各角度の時間変化とともに図65に示す。

【0435】

横軸は1周期分の時間が位相 τ として表わされている。前半が打ち下ろし、後半が打ち上げを示している。各グラフの曲線は前羽軸の羽ばたき角 γf 、後羽軸の羽ばたき角 γb 、水平面からの羽の捻り角 $(\theta - \alpha)$ 、流体力の鉛直方向成分Aおよび水平方向成分Jの時間変化をそれぞれ示している。

【0436】

この例では、単位時間当りの流体力の鉛直方向成分Aにおいては打ち下ろし時の方が打ち上げ時よりも大きいため、1周期の平均で約 500 dyn の鉛直上向きの流体力が1枚の羽で得られる。したがって、2枚の羽では羽ばたき装置の重量が約 1 g 以下であれば浮上することができることになる。また、単位時間当り

の流体力の水平方向成分 J は、1 周期の間にほぼ打ち消されるため、重量 1 g 程度の羽ばたき装置であればホバリング可能となる。

【0 4 3 7】

ここで、打ち下ろし時の位相差 $\phi \downarrow$ を大きく、もしくは、打ち上げ時の位相差 $\phi \uparrow$ を小さくすれば、前進することができる。このとき、水平に前進させるためには、周波数 f を少し小さくするのが望ましい。逆に、打ち下ろし時の位相差 $\phi \downarrow$ を小さくし、もしくは、打ち上げ時の位相差 $\phi \uparrow$ を大きくすれば後退することができる。このとき、水平に後退させるためには、周波数 f を少し大きくすることが望ましい。

【0 4 3 8】

この羽ばたき装置では、たとえば、打ち上げ時の位相差 $\phi \uparrow$ を 16° に保ったまま打ち下ろし時の位相差 $\phi \downarrow$ を 7° と大きくするか、打ち下ろし時の位相差 $\phi \downarrow$ を 4° に保ったまま打ち上げ時の位相差 $\phi \uparrow$ を 11° と小さくし、そして、羽ばたき周波数 $f = 48 \text{ Hz}$ に下げることで、最初の 1 秒間におよそ 1 m の速度で水平に前進することができる。

【0 4 3 9】

また、たとえば、打ち上げ時の位相差 $\phi \uparrow$ を 16° に保ったまま打ち下ろし時の位相差 $\phi \downarrow$ を 1° と小さくするか、打ち下ろし時の位相差 $\phi \downarrow$ を 4° に保ったまま打ち上げ時の位相差 $\phi \uparrow$ を 24° と大きくし、そして、羽ばたき周波数 $f = 54 \text{ Hz}$ に上げることで、最初の 1 秒間におよそ 1 m の速度で水平に後退することができる。

【0 4 4 0】

ホバリング状態のまま、羽ばたき装置を上昇または下降させるためには、周波数 f を上げるかまたは下げるかすればよい。水平飛行中でも、上昇と下降については、主に周波数 f によって制御が可能である。周波数 f を上げることで羽ばたき装置は上昇し、周波数 f を下げることで羽ばたき装置は下降する。

【0 4 4 1】

この例では、打ち上げ動作中もしくは打ち下ろし動作中にも、羽の捻り角 α をゆっくり変化させているが、これは、アクチュエータへの負荷を減らすためであ

る。浮力を得るための羽ばたき運動としては、打ち上げ動作中や打ち下ろし動作中は羽の捻り角 α を一定の値に設定して、打ち下ろし動作から打ち上げ動作、もしくは、打ち上げ動作から打ち下ろし動作への変化点において捻り角 α を急激に変化させるようにしてもよい。

【0 4 4 2】

羽ばたき仰角 $\theta = 0^\circ$ とした場合の鉛直方向成分 A と水平方向成分 J の時間変化を各角度の時間変化とともに図 6 6 に示す。この場合は、ハチドリのホバリングにヒントを得た羽ばたき運動である。なお、左右への舵取りは、左右の羽の羽ばたき運動を別々に制御できる場合、それぞれの羽による推力に差を持たせればよい。たとえば、前方へ飛行中に右方向へ旋回するには、右羽の羽ばたき角 γ を左羽よりも小さくする、または、右羽の前羽軸と後羽軸の位相差を、左羽より大きくする、あるいは、羽ばたき仰角 θ が制御できるような場合には、右羽の θ を左羽よりも小さくするといった制御を行なう。これにより、右羽の推進力が左羽の推進力に比べて相対的に下がり右に旋回することができる。羽ばたき装置を左へ旋回させる場合には、その逆の制御を行なえばよい。

【0 4 4 3】

一方、図 6 3 に示された羽ばたき装置のように、左右の羽を別々に制御することができないような場合には、図 6 4 に示された羽ばたき装置に搭載されているような重心制御部 7 0 7 をこの羽ばたき装置に搭載して、羽ばたき装置の重心を左右にずらすことで左右への旋回を行うことができる。

【0 4 4 4】

たとえば、重心を右にずらして右羽を下方へ左羽を上方へ傾け、そして、周波数 f を大きくすることで、羽ばたき装置を右へ旋回させることができる。重心を左にずらして、同様に、周波数 f を大きくすることで、羽ばたき装置を左に旋回させることができる。なお、この方法は 2 つの羽を別々に制御することができる場合にも適用することができる。また、いずれの羽ばたき装置においても、姿勢の安定を保つために、左右のそれぞれの羽ばたきの周波数 f を同じ値に設定しておくことが望ましい。

【0 4 4 5】

以上の説明では、前（後）羽軸 103, 104 の往復運動する平面が、回転軸 800 と直交する場合について述べてきた。したがって、この場合は、これら 2 つの平面が互いに平行な関係となる。しかしながら、図 64 に示したように、前（後）羽軸 712, 713 の往復運動する平面に角度を持たせてもよい。こうすることで、前（後）羽軸 712, 713 の弾性力や羽の膜 714 の張力により、打ち上げ運動から打ち下ろし運動、あるいは打ち下ろし運動から打ち上げ運動に移る際の、羽の捻り角 α の正值から負値、あるいは、負値から正值への変化を高速化することができる。

【0446】

図 90 に示すように、前（後）羽軸 901, 902 の先端方向が、互いに平行な位置から角度 ε だけ外側を向いている場合、羽軸の付根 905 の幅を w 、羽軸の長さを l として、

$$\sin \varepsilon > \{ (w^2 + 8 \cdot l^2)^{1/2} - w \} / 4 \cdot l$$

を満たす ε であれば、羽の捻り角 $\alpha = 0^\circ$ ($r_f = r_b$) における羽軸先端 906 間の距離 W_0 が最大となるため、そのときの羽軸の弾性力や羽の膜の張力も最大となり、絶対値 $|\alpha| > 0$ の状態の方が安定となるため、捻り角 α の変化を高速化することができる。

【0447】

なお、上式を満たす ε は、羽のアスペクト比 $A_p (l/w) = 1$ のとき、 $\varepsilon > 30^\circ$ 、 $A_p = 4$ のとき、 $\varepsilon > 17.2^\circ$ 、 $A_p = 10$ のとき、 $\varepsilon > 11.5^\circ$ である。

【0448】

さらに、前（後）羽軸 712, 713 が、その軸まわりに軸回転できる自由度を付加すれば、前（後）羽軸 712, 713 同士的位置関係が変化しても、羽の膜 714 が前（後）羽軸 712, 713 に固定されている部分を互いにほぼ向き合せるように、回転することが可能となるため、アクチュエータ 706 にかかる負荷を軽減し、効率のよい制御が可能となる。

【0449】

次に、実施の形態 2 に係る羽ばたき浮上移動装置を説明する。ここでは、実施

の形態 1 の場合と同様に、羽が流体から受ける力を流体力と呼ぶ。また、説明の簡便のため、空気の流れを羽ばたきによってのみ起こる状態、すなわち無風状態を仮定して説明する。

【 0 4 5 0 】

(主要な構成)

まず、羽ばたき装置の主要な構成について説明する。図 6 7 に示すように、支持構造 1 の上部に、右アクチュエータ 2 1 と左アクチュエータ 2 2 が固定されている。右アクチュエータ 2 1 には右羽 3 1 が取付けられ、左アクチュエータ 2 2 には左羽 3 2 が取付けられている。

【 0 4 5 1 】

各アクチュエータ 2 1、2 2 は、それぞれ取付けられた羽 3 1、3 2 をアクチュエータの支点を略中心として 3 自由度をもって回転させることができる。各アクチュエータ 2 1、2 2 の回転は、支持構造 1 に搭載された制御回路 4 によって制御される。

【 0 4 5 2 】

支持構造 1 は、機械的強度を確保したうえで十分軽量であることが望ましい。この羽ばたき装置の支持構造 1 では、略球殻状に成形したポリエチレンテレフタレート (P E T) が用いられている。

【 0 4 5 3 】

また、支持構造 1 には、加速度センサ 5 1 および角加速度センサ 5 2 が搭載されている。これらのセンサ 5 1、5 2 の検出結果は制御装置 4 に送られる。制御装置 4 では、加速度センサ 5 1 および角加速度センサ 5 2 から送られてくる情報によって羽ばたき装置の浮上の状態を検知する。そして、制御装置 4 では、その時刻における目的位置および姿勢により左右アクチュエータ 2 1、2 2 の駆動が決定される。

【 0 4 5 4 】

左右アクチュエータ 2 1、2 2、制御装置 4、加速度センサ 5 1 および角加速度センサ 5 2 は電源 6 に供給される電流によって駆動される。なお、羽ばたき装置の重心は、羽が流体より受ける力のアクチュエータに対する作用点よりも下に

位置している。

【 0 4 5 5 】

(アクチュエータ)

アクチュエータ 2 1、2 2 として、起動トルクが大きいこと、往復運動を確実に実現できること、構造が簡単なことなどから圧電素子 (ピエゾ) を用いたものが望ましい。このようなアクチュエータは超音波モータと呼ばれ、圧電素子によって発生した進行波によって駆動する。

【 0 4 5 6 】

図 6 8 および図 6 9 は、市販の超音波モータ 2 3 を示す。図 6 8 および図 6 9 に示すように、アルミニウムの円盤 2 3 1 の下面には圧電素子 2 3 0 が貼り付けられている。また、円盤 2 3 1 の上面には複数の突起 2 3 2 ~ 2 3 7 が配設されている。各突起 2 3 2 ~ 2 3 7 は円盤 2 3 1 の中心を重心とする正六角形の頂点の位置にそれぞれ配置されている。

【 0 4 5 7 】

圧電素子 2 3 0 の下面には、円周方向に 1 2 分割された電極 2 3 8 が配設されている。各電極は 1 つおきに電氣的に短絡されている。各電極は円盤 2 3 1 を基準に電圧が印加される。これにより、図 7 0 に示すように、圧電素子 2 3 0 にはハッチングのある部分とハッチングのない部分との 2 相の異なる電圧が印加されることになる。

【 0 4 5 8 】

各電極に印加する電圧を時間的に変化させることで、円盤 2 3 1 上には進行波が発生して、突起 2 3 2 ~ 2 3 7 の先端部分が楕円運動を行う。これにより、ロータ 2 3 9 を動かすことができる。超音波モータのステータは上記のように構成される。

【 0 4 5 9 】

この超音波モータ 2 3 のトルクは 1. 0 g f · c m、無負荷回転速度は 8 0 0 r p m、最大消費電流は 2 0 m A である。円盤 2 3 1 の直径は 8 m m である。突起 2 3 2 ~ 2 3 7 が配置されている間隔は 2 m m である。円盤 2 3 1 の厚さは 0. 4 m m である。突起 2 3 2 ~ 2 3 7 の高さは約 0. 4 m m である。圧電素子 2

30の駆動周波数は341kHzである。

【0460】

この羽ばたき装置では、この超音波モータのステータ部分を流用したアクチュエータを用いる。図71および図72に示すように、たとえば右アクチュエータ21では、そのようなステータ210とベアリング211によって球殻状のロータ219が挟み込まれて保持されている。なお、ロータ219と接触するステータ210の部分はロータ219の表面と一致するように加工が施されている。

【0461】

ロータ219は外径3.1mm、内径2.9mmの球殻である。ロータ219の表面部分に右羽主軸311が取付けられている。ステータ210の突起が設けられた面に向かって時計回りにロータ219を搬送させる操作を行うと、右羽主軸311は図72に示す θ の方向に移動する。なお、ステータ210の突起が設けられた面に向かって時計回りの回転を正回転、反時計回りの回転を逆回転とする。

【0462】

そして、図71および図72に示すように、このロータ219を3自由度をもって駆動するために、さらに、上部補助ステータ212、下部補助ステータ213およびベアリング214、215が配設されている。上部補助ステータ212および下部補助ステータ213のそれぞれの大きさは、ステータ210の大きさの約0.7倍である。

【0463】

各ステータ210、212、213は、ロータ219を挟んでそれぞれ直交するようには配設されていないが、各ステータ210、212、213により、それぞれ独立した回転をロータ219に与えることができる。これにより、それぞれの回転運動を組合わせることによって、ロータ219を3自由度をもって駆動することができる。

【0464】

たとえば、ロータ219に対して上部補助ステータ212によって正回転を与え、下部補助ステータ212によって正回転を与えることによって、ロータ21

9 を β 方向に回転させることができる。また、ロータ 2 1 9 に対して上部補助ステータ 2 1 2 によって逆回転を与え、下部補助ステータ 2 1 2 によって正回転を与えることによって、ロータ 2 1 9 を α 方向に回転させることができる。

【 0 4 6 5 】

実際の駆動に際して、回転中心の異なる 2 つの回転を行わせることは摩擦により超音波モータの効率を低下させることになる。そこで、たとえば上部補助ステータ 2 1 2 と下部補助ステータ 2 1 3 を、ごく短時間の周期でもって交互に動作させ、その間に、動作していないステータの突起をロータ 2 1 9 に接触させないなどの駆動方法を採用することが望ましい。

【 0 4 6 6 】

これには、ステータの電極すべてに、圧電素子の収縮方向に電圧を印加することで、付加的な要素を設けることなく容易に実現することができる。

【 0 4 6 7 】

また、圧電素子の駆動周波数は 3 0 0 k H z 以上である。一方、羽ばたき装置の羽ばたき周波数はせいぜい 1 0 0 k H z である。したがって、圧電素子の駆動周波数は、羽ばたき装置の羽ばたき周波数に比べて十分に高速であるので、交互にアクチュエータを動作させても、実質上滑らかな動きを右羽主軸 3 1 1 に与えることができる。

【 0 4 6 8 】

上述したアクチュエータのステータは、実現されており入手可能である。また、アクチュエータに用いられるベアリング類も、たとえばディスクドライブなどの小型の情報機器、または宇宙機器の分野において重量的にこの羽ばたき装置に適用できるものが実用化されている。

【 0 4 6 9 】

また、ステータの発生する進行波の振幅がサブミクロンオーダーであるので、ロータはこのオーダーの真球度であることが要求される。民生用の光学製品に用いられている放物面鏡の加工精度は光の波長の 8 分の 1 程度、すなわち可視領域において用いられている光学製品では 7 0 n m 以下であり、また、光学干渉計に用いられる光学部品の加工精度は光の波長の 1 0 0 分の 1 程度、すなわち、数 n m の

オーダであることから、このようなサブミクロンオーダの真球度を有するロータを既存の加工方法により形成することが可能である。

【0470】

このようにして、市販の超音波モータと同等の特性を有し3自由度の運動を与えることのできるアクチュエータが構成される。なお、これは、3自由度の運動を羽に与えるアクチュエータを超音波モータによって構成した一例に過ぎず、羽ばたき装置の各構成要素の配置、サイズ、材質および駆動方法などは、羽ばたき飛行に要求される物理的機能、たとえばトルク等が実現できるならばこれに限られるものではない。

【0471】

(羽とその動作)

次に、羽とその動作について説明する。説明の簡便のため、図67に示すように、羽ばたき装置に固定された座標系(x 、 y 、 z)を定義する。すなわち、略球状の支持構造1の略中心(球心)を原点とする。また、重力加速度の方向を下方向、その逆を上方向とする。原点から上方に向かって z 軸を定義する。次に、右アクチュエータ21の形状中心と左アクチュエータ22の形状中心を結ぶ方向を左右方向とし、原点から左羽に向かって y 軸を定義する。また、原点から y 軸と z 軸の右手系における外積方向に x 軸を定義する。 x 軸正の方向を前方、 x 軸負の方向を後方と称する。

【0472】

また、図67に示す羽ばたき装置では、右羽31の右アクチュエータ21に対する力学的作用点A1と、左羽32の左アクチュエータ22に対する力学的作用点A2の中点A0から、重力加速度方向に下ろした線上に本装置の重心Oが位置する状態である。

【0473】

この羽ばたき装置の場合、左アクチュエータ22のロータ229は略球状であり、主軸321の延長線上にこのロータ220の球心が位置するように左羽32が配置されている。左アクチュエータ22に対する力学的作用点A2および主軸321の回転運動の支点はこの球心に一致している。右アクチュエータ21につ

いても同様である。

【0474】

以後、上述したx軸、y軸およびz軸は支持構造1に対して固定された本羽ばたき装置における固有の座標系であるとする。

【0475】

一方、羽ばたき装置に固定された座標系に対して、空間に固定され任意の点を原点とする空間座標として、x'軸、y'軸およびz'軸を定義する。これにより、羽ばたき装置が移動する空間の座標はx'軸、y'軸およびz'軸のそれぞれの座標を用いて表わされ、羽ばたき装置における固有の座標はx軸、y軸およびz軸のそれぞれの座標を用いて表わされる。

【0476】

次に、羽の構造について説明する。図73に示すように、たとえば左羽32は主軸321および枝322を有する支持部材に膜323を張ることで形成されている。主軸321は左羽32において前方よりの位置に配置されている。また、枝322は先端部に近づくほど下方に向いている。

【0477】

左羽32は上に凸状の断面形状を有する。これによって、特に打ち下ろしの際に流体から受ける力に対して高い剛性が得られる。軽量化のため主軸321と枝322は中空構造であり、それぞれカーボングラファイトから形成されている。膜323はその面内において収縮する方向に自発的な張力を有しており、羽全体の剛性を高める働きをしている。

【0478】

本発明者らが実験に用いた羽の主軸321の直径は、支持構造1に支持された根元の部分では100 μ m、先端部では50 μ mであり、主軸321は根元から先端部へ向かって細くなったテーパ形状となっている。また、膜323はポリイミドであり、大きさは前後方向約1cm、左右方向約4cm、厚さは約2 μ mである。

【0479】

なお、図73に示された左羽32では、説明のために主軸321はその太さが

拡大されている。図示されない右羽 3 1 は xz 平面を挟んで左羽 3 2 と鏡面对称になるように支持構造に取付けられている。

【0480】

次に、羽の動作について左羽 3 2 を例に挙げて説明する。左アクチュエータ 2 は、左羽 3 2 を 3 自由度をもって回転させることが可能である。つまり、左羽 3 2 の駆動状態（羽ばたき状態）は左羽 3 2 の姿勢で表わすことができる。以後説明の簡便のため、図 6 7 に示された状態に基づき左羽 3 2 の姿勢を次のように定義する。

【0481】

まず、図 7 4 に示すように、主軸の回転運動の支点（力学的作用点 A_2 ）と x 軸および y 軸にそれぞれ平行な軸（ $//x$ 、 $//y$ ）を含む xy 平面に平行な平面を基準として、点 A_2 と左羽 3 2 の主軸 3 2 1 の根元とを結ぶ線分がその平面となす角度を羽ばたきのストローク角 θ とする。また、主軸の回転運動の支点（力学的作用点 A_2 ）と y 軸および z 軸にそれぞれ平行な軸（ $//y$ 、 $//z$ ）を含む yz 平面に平行な平面を基準として、点 A_2 と左羽 3 2 の主軸 3 2 1 の根元とを結ぶ線分がその平面となす角度を偏角 α とする。

【0482】

このとき、ストローク角 θ は xy 平面に平行な平面より上方では正とし下方では負とする。また偏角 α は yz 平面に平行な平面よりも前方では正とし後方では負とする。

【0483】

そして、図 7 5 に示すように、左羽 3 2 の主軸 3 2 1 の根元における膜 3 2 3 の接平面 p_1 が、点 A_2 を通り x 軸と平行な軸（ $//x$ ）と主軸 3 2 1 を含む平面 p_0 となす角度を捻り角 β とする。このとき、捻り角 β は主軸 3 2 1 の根元から先端に向かって見たときに時計回りを正とする。

【0484】

（浮上方法）

次に、浮上方法について説明する。説明の簡便のため、この羽ばたき装置にかかる外力は、羽が流体から受ける力すなわち流体力と、羽ばたき装置に作用する

重力（羽ばたき装置の質量と重力加速度との積）のみであるとする。この羽ばたき装置においても、恒常的に浮上するには1回の羽ばたき動作の間に時間平均して、次の関係、

（羽に作用する鉛直上方向の流体力）＞（本羽ばたき装置に作用する重力）
を満たすことが必要とされる。

【0485】

ここでは、昆虫の羽ばたきを単純化した羽ばたき法により、打ち下ろし時の流体力を、打ち上げ時の流体力より大きくする方法について説明する。説明の簡便のため、流体の挙動もしくはそれが羽に及ぼす力については、その主要成分を挙げて説明する。また、この羽ばたき法により得られる浮上力と、本羽ばたき装置に作用する重力の大小については後述する。

【0486】

羽には、羽が運動する方向と逆方向の流体力が作用するので、羽の打ち下ろし時には羽に上向きの流体力が作用し、打ち上げ時には羽に下向きの流体力が作用する。そこで、打ち下ろし時に流体力を大きくし、打ち上げ時には流体力を小さくすることで、1回の羽ばたき動作（打ち下ろし動作と打ち上げ動作）の間で時間平均すると上方向の流体力が得られることになる。

【0487】

そのためには、まず、打ち下ろし時には羽が移動する空間の体積が最大になるように打ち下ろせば、羽にはほぼ最大の流体力が作用する。これは、羽の接平面と略垂直に羽を打ち下ろすことに相当する。一方、打ち上げ時には羽が移動する空間の体積が最小になるように打ち上げれば、羽に及ぼされる流体力はほぼ最小となる。これは、羽の断面の曲線にほぼ沿って羽を打ち上げることに相当する。

【0488】

このような羽の動作について羽の主軸321に垂直な断面図を用いて説明する。まず、図76は羽が移動する空間の体積が最大になるように打ち下ろした場合を示し、図77は羽が移動する空間の体積が最小になるように打ち上げた場合を示す。

【0489】

図 7 6 および図 7 7 では、移動前の羽の位置が破線で示され、移動後の羽の位置が実線で示されている。また、羽の移動方向が一点鎖線の矢印によって示されている。さらに、羽に作用する流体力の方向が実線の矢印によって示されている。同図に示すように、流体力は羽の移動方向とは逆向きに羽に作用する。

【 0 4 9 0 】

このように、打ち上げ時における羽が移動する空間の体積が打ち下ろし時における羽が移動する空間の体積よりも大きくなるように羽の姿勢を羽の移動方向に対して変化させて、1 回の羽ばたき動作の間の時間平均において、羽に作用する上方向の流体力を羽ばたき装置に作用する重力よりも大きくすることができる。

【 0 4 9 1 】

この羽ばたき装置では、羽の捻り角 β を時間的に変化させることによって上述した羽の運動が実現される。

【 0 4 9 2 】

具体的には、次のステップ S 1 ～ S 4 が繰返される。まず、ステップ S 1 では、図 7 8 に示すように羽の打ち下ろし（ストローク角 $\theta = +\theta_0 \rightarrow -\theta_0$ ）が行われる。ステップ S 2 では、図 7 9 に示すように羽の回転 1（羽の捻り角 $\beta = \beta_0 \rightarrow \beta_1$ ）動作が行われる。ステップ S 3 では、図 8 0 に示すように羽の打ち上げ（ストローク角 $\theta = -\theta_0 \rightarrow +\theta_0$ 、捻り角 $\beta = \beta_1 \rightarrow \beta_2$ （流体力を最小限にとどめるための羽の断面の曲線に沿った運動））が行われる。ステップ S 4 では、図 8 1 に示すように羽の回転 2（羽の捻り角 $\beta = \beta_2 \rightarrow \beta_0$ ）動作が行われる。

【 0 4 9 3 】

ステップ S 1 およびステップ S 3 における羽に作用する流体力を時間平均すると、上向きの流体力が羽ばたき装置に作用する重力よりも大きくなる。ステップ S 2 およびステップ S 4 においても羽に作用する流体力の時間平均が上向きの流体力であることが望ましい。

【 0 4 9 4 】

この羽ばたき装置では、図 7 8 ～ 図 8 1 に示すように、羽の前縁近傍に羽の回転中心（主軸 3 2 1 部分）が位置している。つまり、主軸 3 2 1 から羽の後縁までの長さの方が主軸 3 2 1 から羽の前縁までの長さよりも長くなっている。この

ため、図 7 9 および図 8 1 に示すように、羽の回転動作においては羽の回転方向に沿って生じる流体の流れに加えて、主軸 3 2 1 から羽の後縁に向かう方向に沿って流体の流れが生じることになる。

【0 4 9 5】

そして、羽にはこのような流体の流れの反作用としてそれぞれの流れの向きとは逆向きの力が作用することになり、図 7 9 に示すステップ S 2 では実質的に上向きの流体力が羽に与えられ、図 8 1 に示すステップ S 4 では主に下向きの流体力が羽に与えられることになる。

【0 4 9 6】

図 8 0 に示すステップ S 3 では、羽の断面の曲線に沿うように捻り角 β を β_1 から β_2 に変化させながら打ち上げ動作が行われる。また、図 7 9 に示すステップ S 2 における羽の回転角は図 8 1 に示すステップ S 4 における羽の回転角よりも大きい。これにより、ステップ S 2 およびステップ S 4 においても羽に上向きに作用する流体力が下向きに作用する流体力よりも勝って、時間平均すると上向きの流体力が羽に作用することになる。

【0 4 9 7】

なお、図 7 8 ～図 8 1 では、それぞれのステップ S 1 ～ S 4 における羽の移動前の姿勢が破線で示され、移動後の姿勢が実線で示されている。各ステップ S 1 ～ S 4 における羽の移動方向が一点鎖線の矢印によって示されている。また、各ステップ S 1 ～ S 4 において主に発生する流体の流れが実線の矢印によって示されている。

【0 4 9 8】

次に、ストローク角 θ および捻り角 β の値を時間の関数として表したグラフを図 8 2 に示す。ただし、図 8 2 ではストローク角 θ および捻り角 β のそれぞれの縦軸の比率は異なっている。

【0 4 9 9】

本発明者らの行なった実験においては、 θ_0 はたとえば 60° である。 β_0 はたとえば 0° である。 β_1 はたとえば -120° である。 β_2 はたとえば -70° である。

【0500】

上述した説明では、説明の簡便のためステップS1～S4は独立した動作としたが、たとえばステップS1において羽を打ち下ろしながら羽の捻り角を大きくしていくような動作も可能である。また、上述した例は第1近似的な考察から説明されるものであり、実際に浮上可能な羽ばたき方法はこれに限られるものではない。

【0501】

また、ここでは左羽について説明したが、右羽についても xz 平面に関して鏡面对称に左手系に基づくストローク角 θ 、偏角 α および捻り角 β を定義すれば同一の議論が成立する。以下、羽に作用する上向きの流体力を浮上力とし、羽に作用する前向きの流体力を推進力とする。

【0502】

(制御方法)

次に、羽ばたき装置に任意の運動を行なわせる制御方法について説明する。ここでは、本羽ばたき装置の左羽については右手形に基づくストローク角 θ 、偏角 α および捻り角 β を用い、そして、右羽については xz 平面に対して鏡面对称の左手形に基づくストローク角 θ 、偏角 α および捻り角 β を用いて羽の姿勢を示す。

【0503】

(制御フロー)

羽ばたきによる浮上移動は羽にかかる流体力によって行なわれるので、羽の運動により直接制御されるのは、本羽ばたき装置に与えられる加速度と角加速度である。

【0504】

まず、 S を目標とする浮上状態と現在の浮上状態との差異、 $T(S)$ を浮上状態から加速度、角加速度への変換を表わす関数、 s を加速度、角加速度 $F\alpha(s)$ を、加速度センサ51、角加速度センサ53のセンサ応答を含めた制御アルゴリズムを表わす関数、 $s\alpha$ をアクチュエータ制御量、 $G_W(s\alpha)$ をアクチュエータと羽の応答を表わす関数、 s_W を羽の運動、 $G_{fS}(s_W)$ を羽の運動により本

羽ばたき装置に及ぼされる加速度もしくは角加速度 s_e を表わす関数、 S_e がこの一連のプロセスにより行なわれる浮上状態の変更とすると、入力 S より出力 S_e が得られるプロセスは図 87 に示すようなものとなる。

【0505】

また、実際には、羽と流体の慣性力により、現在までの羽の運動、流体の運動の時刻歴に依存する影響 R_w と R_{fS} が G_w と G_{fS} に加わることになる。

【0506】

(動作分割)

当然、 F_α 以外のすべての関数を正確に求め、これにより $S = S_e$ となる制御アルゴリズム F_α を算出する手法もあり得るが、本羽ばたき装置周囲の流体の流れと羽の運動の時刻歴が必要であり、膨大なデータ量と演算速度を必要とする。また、流体と構造の連成した挙動は複雑で、多くの場合カオティックな応答になってしまうため、実用的でない。

【0507】

そこで、予め基本的な動作パターンを用意しておき、目標とする浮上状態を分割してこれらの基本動作パターンを時系列にて組合わせて実現する手法が簡便で望ましい。

【0508】

物体の運動には x 方向、 y 方向、 z 方向の 3 自由度の並進自由度と、 θ_x 方向、 θ_y 方向、 θ_z 方向の 3 自由度の回転自由度、つまり 6 自由度が存在する。すなわち、前後、左右、上下、そしてこれらの方向を軸とする回転である。

【0509】

このうち、左右への移動は、 θ_z 方向の回転と前後方向への移動を組合わせて行なうことができる。そこで、ここでは、前後方向、すなわち x 軸方向への並進移動、上下方向、すなわち z 軸方向への並進動作、また、 x 軸、 y 軸、 z 軸回りの回転動作についてそれぞれ実現方法を説明する。

【0510】

(動作)

(1) 上下方向 (z 軸方向) の動作

羽が移動することで、羽が流体から受ける力は羽の移動速度に依存するので、羽に及ぼされる上向きの流体力を大きく（小さく）するには、

A：ストローク角 θ の振幅を大きく（小さく）する

B：羽ばたき周波数を大きく（小さく）する

などの方法がある。これらによって本羽ばたき装置は上昇（下降）することができる。ただし、流体力には負の値も含まれる。

【0511】

なお、これらの手法によれば、羽が流体から受ける流体力そのものが大きくなるので、羽が流体力を上下方向以外から受けることによって、羽の力学的支点到羽から上下方向以外の力が及ぼされている際には、上昇とともにその方向へこの支点にかかる力の増加も伴う。たとえば、前方にほぼ等速直線運動を行なっている際に、羽ばたき周波数を大きくすると、本羽ばたき装置は速度増加を伴って上昇する。このように、現時点での羽ばたき方によって、副次的にこういった他の運動を伴うが、以後特に断らない限り、停空状態からの制御について説明する。

【0512】

また、羽の捻り角 β を変えて、羽が移動する空間の体積を変化させることによって浮上力は変化する。たとえば、打ち上げ時における羽が移動する空間の体積がより大きく、もしくは、打ち下ろし時における羽が移動する空間の体積がより小さくなるような β を与えることで、羽に作用する上向きの流体力の時間平均は小さくなる。

【0513】

実際には、羽は剛体ではなく変形を伴うため、同一の β によっても羽が移動する空間の体積は変化するが、第1原理的には、羽の移動する方向に垂直な β が最も大きな羽が移動する空間の体積を与える。また、羽が移動する方向に平行な β が最も小さな羽が移動する空間の体積を与える。

【0514】

なお、この場合、副次的に、羽ばたきと垂直方向にも流体力が作用するため、これが制御上支障を生じるレベルである場合はこれを打ち消す羽の動きを付加する必要がある。最も単純には偏角 α の変更により実現できる。

【0515】

また、前記のステップS2もしくはステップS4において羽の回転角速度を変化させることによってz軸方向の動作を行なうことは可能である。たとえば、ステップS2において羽の回転角速度($-d\beta/dt$)を大きくすると、この回転によって生じる流体の下方向への流速が大きくなるため、この反作用によって羽に作用する上向きの流体力が大きくなる。

【0516】

なお、この場合、本羽ばたき装置に及ぼされる、羽の主軸を回転軸とするトルクが副次的に変化する。よって、この変化が制御上支障ない範囲に収まる範囲内でこの回転角速度変化を行なうことが望ましい。

【0517】

また、この場合、本羽ばたき装置に及ぼされる、前後方向への力も副次的に変化する。よって、この変化が制御上昇に支障をきたす場合は、(2)として後述する前後方向への力の制御も同時に行なうことが望ましい。

【0518】

(2) 前後方向(x軸方向)の動作

前述した羽ばたき方法では、主にステップS2とステップS4にて、x方向の向きへの流体力が羽に作用する。したがって、この羽の動かし方においては前進を伴い浮上する。

【0519】

また、打ち下ろしの際に偏角 α を増加し羽を前方に移動させることで、羽には後向きの流体力が作用することになる。したがって、打ち下ろしの際の、すなわち、ステップS1における偏角 α を制御して、ステップS1における羽に作用する後向きの流体力を他の主にステップS2とステップS4における前向きの流体力よりも大きくすれば後退し、小さくすれば前進することができる。また、この2力がほぼ釣り合えば前後方向に静止することができる。

【0520】

特に、本羽ばたき装置が前後方向に静止しており、左右の羽がほぼ対称な運動を行ない、重力と本羽ばたき装置における浮上力が釣り合っているならば、ホバ

リング状態が実現できる。

【0521】

なお、偏角 α の変更に伴い副次的に、羽に及ぼされる流体力の鉛直方向成分が変化するので、これが制御上支障を生じるレベルにある場合にはこれを打ち消す羽の動きを付加する必要がある。これは、主に、前述の(1)の上下方向の動作によって行なうのが簡便である。

【0522】

さらに、前述したステップS2とステップS4において羽の回転動作の角速度を大きくすると前向きの流体力が増加し、小さくすると減少する。これによっても前後方向の動作を変化させることができる。

【0523】

また、(1)に述べた羽の捻り角 β の変更に伴う副次的な流体力のうち、 x 軸方向成分を利用する手法も可能である。つまり、打ち下ろし時に $\beta > 0$ なら前方向への、 $\beta < 0$ なら後方向への力が働く。

【0524】

なお、打ち上げ時の β 、 α 、 θ の関係はある程度拘束されているが、以上の流体力の制御はステップS3においても可能である。

【0525】

(3) z 軸を回転軸とする回転動作

(2)において述べた前後方向への制御を、左羽と右羽について個別に行ない、これを異ならせることで本羽ばたき装置にトルクを与えることができる。

【0526】

すなわち、右羽の前向きの流体力を左羽のそれに対して高くすれば本羽ばたき装置は x 軸正の向きに向かって左方向を向き、低くすれば同じく右方向を向く。

【0527】

(4) x 軸を回転軸とする回転動作

(3)と同様に、右羽の上向きの流体力を左羽のそれに対して大きくすれば右側が持ち上がり、小さくすれば左側が持ち上がる。これによって、 x 軸を回転軸とする回転動作を行なわせることができる。

【 0 5 2 8 】

(5) y 軸を回転軸とする回転動作

(2) に述べた、羽の捻り角 β の角速度変更によって、本羽ばたき装置にかかる y 軸回りのトルクを変化させることができる。これにより、y 軸を回転軸とする回転動作を行なうことができる。たとえば、ステップ S 1 における捻り角 β の回転角速度を大きくすると本羽ばたき装置は機首を下げ、逆に小さくすると機首を上げる。

【 0 5 2 9 】

(6) ホバリング (停空飛翔)

羽ばたき装置を停空させる際のストローク角 θ および偏角 α ならびに捻り角 β の値を時間の関数として表わしたグラフを図 8 3 に示す。ただし、図 8 3 ではそれぞれの角度の縦軸の比率と異なっている。

【 0 5 3 0 】

本発明者らが行なった実験においては、 θ_0 はたとえば 60° である。 β_0 はたとえば -10° である。 α_1 はたとえば 30° である。 β_1 はたとえば -100° である。 β_2 はたとえば -60° である。

【 0 5 3 1 】

各ステップにおける左羽の運動とそれにより左羽の力学的支点 A 2 に生じる加速度、角加速度を図 8 8 に示す。ただし、(3) (4) の x 軸、z 軸を回転軸とする回転動作については略してある。これらは、前述のとおり、左右の羽の運動の非対称によって起こされる。

【 0 5 3 2 】

(制御方法決定手法)

現在の浮上状態は、図 8 5 に示すように、羽ばたき装置に搭載された加速度センサ 5 1 や角加速度センサ 5 2 が取得した値を適宜変更した値を用いて求められる。たとえば、速度は、加速度を時間積分した値に速度の初期値を与えることで求められる。また、位置は、速度を時間積分した値に位置の初期値を与えることで求められる。なお、浮上状態に、浮上状態の時刻歴を含む手法も可能である。

【 0 5 3 3 】

図 8 4 に示すように、制御装置 4 は、加速度センサ 5 1 および角加速度センサ 5 2 から得られる現在の浮上状態と目的とする浮上状態から、本羽ばたき装置の動作を決定する。この制御は、三次元で行なわれる点以外は従来から行なわれている制御手法を適用することができる。

【 0 5 3 4 】

本羽ばたき装置の動作は、制御装置 4 にて、アクチュエータの駆動に変換される。この変換には、テーブル参照、もしくはその補完を用いるのが高速である。たとえば、図 8 9 に示すように、基本となる動作と、それを実現するアクチュエータの駆動の組合せを予め用意しておく。なお、図 8 9 の左端列は目的とする動作、羽ばたきにおける A と B は、A は前進時の羽ばたき方、B は停空時の羽ばたき方であり、より具体的にはそれぞれ図 8 2、図 8 3 にグラフで示される α 、 β 、 θ の時刻歴を時間的に離散化したものである。制御装置 4 は、本羽ばたき装置の動作から、この駆動もしくはその補完した駆動をこのテーブルより算出する。

【 0 5 3 5 】

ここでは、説明のため一旦本羽ばたき装置の動作を算出し、これをアクチュエータの駆動に変換するという手法を用いたが、浮上状態から直接アクチュエータの駆動を選択する手法も可能である。

【 0 5 3 6 】

たとえば、定位制御を行なう場合、現在位置と目標位置との差によって、上述したアクチュエータの駆動のいずれかもしくはそれを補完した駆動を直接算出する手法も可能である。

【 0 5 3 7 】

また、当然、羽ばたき装置の浮上状態を表わす物理量はここに示した位置、速度、加速度などに限らない。

【 0 5 3 8 】

また、当然、アクチュエータの駆動を決定する手法はこの態様に限らない。

上述した制御方法を用いることで、羽ばたき装置は変更を適宜行いながら目的位置へ到達することができる。

【 0 5 3 9 】

(浮上可能重量)

本発明者らの羽ばたき装置では、ステータ 2 1 0 は超音波モータ 2 3 と同等であるので、 θ 方向の運動に対するトルクは $1.0 \text{ gf} \cdot \text{cm}$ である。そこで、本発明者らは、シミュレーションによりこのトルクをもって羽ばたいた場合の流体力を求めた。

【0 5 4 0】

羽の大きさを長辺 4 cm \times 短辺 1 cm の矩形とした。なお、長辺はアクチュエータから離れる方向とした。また、羽の変形を無視した。幅 8 mm 、長さ 33 mm のトンボの羽の質量が約 2 mg であったので、この値に基づいて羽の質量を 3 mg とした。

【0 5 4 1】

また、超音波モータは、突起の先端部分の微小な楕円運動によってロータを駆動するため、実際の駆動トルクの立ち上がり立下りは楕円運動の周期のオーダ、すなわち、 100 kHz のオーダであるが、計算の安定性の制約から、 $\pm 250 \text{ gf} \cdot \text{cm} / \text{sec}$ であるとした。

【0 5 4 2】

この羽に対して、一方の短辺をこの辺を回転軸とする回転自由度のみを残して固定し、この回転軸にトルクを与え、この回転軸に作用する反力を算出した。その結果を図 8 6 に示す。なお、偏角 α は 0° であり、捻り角 β も 0° である。

【0 5 4 3】

図 8 6 に示すように、時刻 0 秒においては、羽は水平（ストローク角 $\theta = 0^\circ$ ）である。時刻 0 秒から時刻 0.004 秒までの間に、トルクの値を $1 \text{ gf} \cdot \text{cm}$ までほぼ直線的に増加させる。時刻 0.004 秒から時刻 0.01 秒の間では、トルクの値を $1 \text{ gf} \cdot \text{cm}$ に保つ。時刻 0.01 秒から時刻 0.018 秒までの間に、トルクの値を $1 \text{ gf} \cdot \text{cm}$ から $-1 \text{ gf} \cdot \text{cm}$ までほぼ直線的に変化させる。時刻 0.018 秒から時刻 0.03 秒の間では、トルクの値を $-1 \text{ gf} \cdot \text{cm}$ に保つ。時刻 0.03 秒から時刻 0.038 秒までの間に、トルクの値を $-1 \text{ gf} \cdot \text{cm}$ から $1 \text{ gf} \cdot \text{cm}$ までほぼ直線的に変化させる。

【0 5 4 4】

このようなトルクを与えることによって得られる接点反力の、打ち下ろしの間の時間平均は約 0.29 gf であった。打ち下ろしの間とはトルクが負である時間であり、具体的には時刻 0.014 秒から時刻 0.034 秒までの間である。

【0545】

このシミュレーションは1自由度の羽ばたき運動における結果であるため、打ち上げ時における流体力の作用は不明である。しかしながら、断面積に比べて流体の抵抗は減少するので、打ち上げ時に作用する下向きの支点反力は小さいこと、そして、その力が作用する時間は比較的短いこと、さらに、打ち下ろし以外にも羽の回転などを用いて浮上力が得られることから、 $1 \text{ gf} \cdot \text{cm}$ のトルクを有するアクチュエータを用いて、 0.29 g 程度の質量のものを浮上させることは可能であるといえる。

【0546】

すなわち、本羽ばたき装置の全体の質量を 0.58 g 以下に抑えることで、羽ばたき装置は浮上することができる。以下、羽ばたき装置の質量について検討する。

【0547】

まず、ステータ 210 は、その電極と圧電素子が薄いことで、比重 2.7 、厚さ 0.4 mm 、半径 4 mm の円盤と同等である。これにより、ステータ 210 の質量は 0.054 g である。また、補助ステータの質量は、ステータの直径がステータ 210 の直径の 0.7 倍であることから 0.019 g である。

【0548】

3つのベアリングはいずれも外径 4.2 mm 、内径 3.8 mm および厚さ 0.4 mm のドーナツ状のボールベアリングである。ベアリングを構成する材質は比重 4.8 のチタンであり、約 30% の空隙があるため、ベアリングの質量は約 0.013 g である。

【0549】

また、ロータ 219 の材質はアルミニウムであり、壁厚半径 3 mm 、厚さ 0.2 mm であることから、ロータ 219 の質量は約 0.061 g である。これらを合計すると、アクチュエータ 21 の質量は 0.192 g である。

【0550】

また、羽の質量は前述したように0.003gである。羽ばたき装置全体では、上記アクチュエータと羽が左右にそれぞれ1つつ設けられているので、羽ばたき装置全体ではこれらの質量は0.390gとなる。

【0551】

さらに、この羽ばたき装置の支持構造1は、直径1cm、比重0.9、厚さ0.1mmの球体であることから、支持構造1の質量は約0.028gとなる。

【0552】

また、制御装置4、加速度センサ51および角加速度センサ52はそれぞれ5mm×5ミリの半導体ベアチップから形成され、質量はいずれも約0.01gである。したがって、制御装置4、加速度センサ51および角加速度センサ52を合わせた質量は約0.03gとなる。そして、羽ばたき装置に搭載される電源6の質量は0.13gである。

【0553】

以上より、羽ばたき装置の質量の合計は0.578gとなる。1対の羽により浮上力は0.58gfであるので、この羽ばたき装置は浮上することが可能になる。

【0554】

なお、電源6には以下に説明する重量パワー密度が要求される。まず、この羽ばたき装置の左右アクチュエータにおける最大消費電力は合計40mAである。電源電圧は3Vである。電解質重量が0.1gであるので、電源6には0.12W/0.1g、すなわち1200W/kgの重量パワー密度が要求される。

【0555】

たとえば、市販品のリチウムイオンポリマー2次電池の重量パワー密度は約600W/kgである。この値は携帯電話などの情報機器に用いられている重量10g以上の製品についてのものである。

【0556】

一般に、電解質重量に対する電極面積の比は電源のサイズに反比例する。この羽ばたき装置に搭載される電源6は、上述した情報機器などに用いられている2

次電池の10倍上の電極面積比を有する。したがって、この電源6はそのような2次電池の約10倍の重量パワー密度を有することができ、上述した重量パワー密度を有することが可能である。電源6の電解質重量を約0.1gとすると、この羽ばたき装置においては約7.5分の飛行が可能になる。また、燃料電池等には、リチウムイオンポリマー2次電池よりも高い重量パワー密度を達成できるものもあり、当然、これらを利用することも、たとえば、質量といった条件が飛行可能な範囲ならば可能である。

【0557】

また、羽の羽ばたき動作により熱が発生することが懸念される。たとえば、アクチュエータを構成する材質がアルミニウムであるとし、その比熱を $0.215 \text{ cal} / (\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ とすると、アクチュエータの質量は0.192gであるので、アクチュエータに供給されるエネルギーがすべて熱に変換（エネルギー変換効率0%）されたとしても 0.35°C 、また、供給されるエネルギーの70%が熱に変換されたとしても 0.24°C の温度上昇になる。

【0558】

実際には、羽ばたき装置において発生した熱は、羽ばたき装置から放出されることになる。たとえば、厚さ約6mmの光ディスクの場合、光ディスク面に6mW程度のレーザ光を連続照射させた場合、光ディスク表面上の約 $1 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 程度の楕円領域では平均約 100°C 程度まで上昇するが、表面から数十 μm の深さの位置ではほとんど光ディスクが置かれている周囲の温度程度まで下がっていることがわかっている。

【0559】

このことから、60mW程度のエネルギーでは、ミリメートルオーダのアクチュエータを 1°C 上昇させることすらありえないと考えられる。

【0560】

（その他）

図67に示すように、この羽ばたき装置では支持構造1として略球殻状に成形したポリエチレンテレフタレート（PET）を例に挙げて説明したが、材料や形状はこれに限られるものではない。また、アクチュエータの配置や羽の形状につ

いても飛行の性能を損なわないならば、図 6 7 に示すものに限られない。

【 0 5 6 1 】

特に、この羽ばたき装置では安定性を重視して自然に図 6 7 に示す姿勢となるように、重心を羽の力学的作用点よりも下に位置させたが、重心と力学的作用点の位置を一致させる方が姿勢制御に必要な左右の羽の流体力の差が最も小さくて済むので、羽ばたき装置の姿勢を容易に変更することができる。

【 0 5 6 2 】

また、本羽ばたき装置では、加速度センサと角加速度センサにより羽ばたき装置の位置と姿勢を検出するものとしたが、羽ばたき装置の位置と姿勢が計測可能な手段であるならば上述したセンサに限られない。

【 0 5 6 3 】

たとえば、互いに直交する 3 軸方向の加速度を測定することが可能な少なくとも 2 つの加速度センサを支持構造 1 の異なる位置にそれぞれ配置させて、その加速度センサから得られる加速度情報に基づいて羽ばたき装置の姿勢を算出することも可能である。また、羽ばたき装置が移動する空間内に磁場分布を設けておき、磁気センサによりこの磁場分布を検知することで羽ばたき装置の位置と姿勢を算出する方法も可能である。

【 0 5 6 4 】

また、加速度センサ 5 1、角加速度センサ 5 2 をはじめとするセンサ類は、制御装置 4 とは別部品として示されているが、軽量化の観点から、マイクロマシニング技術により制御装置 4 と一体で同一のシリコン基板上に形成してもよい。

【 0 5 6 5 】

また、本羽ばたき装置では羽の駆動をオープンループ制御としているが、羽の付け根に羽の角度センサを設け、この角度センサから得られる角度情報によりクローズドループ制御を行なうことも可能である。

【 0 5 6 6 】

さらに、浮上する空間における流体の流れが既知であり、予め定められた羽ばたき方法によって浮上することが可能ならば、ここに挙げたセンサ類は必須ではない。

【0567】

また、この羽ばたき装置では進行波を用いた超音波素子によって直接羽を駆動させたが、羽を駆動する構造やアクチュエータの種類についても、上述したものに限られない。たとえば、特開平5-169567号公報に記載されているように、外骨格構造とリニアアクチュエータを組合わせて用いた羽ばたき構造も可能である。

【0568】

また、駆動エネルギーとして電力を用いたが、内燃機関を用いることも可能である。さらに、昆虫の筋肉に見られるような、生理的酸化還元反応を用いたアクチュエータも用いることが可能である。あるいは、アクチュエータの駆動エネルギーを外部から取得する方法も可能である。たとえば、電力については熱電素子、電磁波などが挙げられる。

【0569】

上述した実施の形態1および実施の形態2に係る羽ばたき装置によれば、地面を離れて浮上することができるので、段差を乗り越える能力と隙間を通り抜ける能力とのトレードオフが存在しなくなる。

【0570】

たとえば、家庭環境において一般的な住人の目の高さ程度（1.5m程度）に位置する障害物は、大型の家具や空調機等のようにほとんどその位置が固定されている。また、空調機や照明器具などは壁面や天井に固定されており、これらが移動することはほとんどない。

【0571】

したがって、障害物が少なく障害物の位置がほとんど変化しない領域（空間）にまで羽ばたき装置が浮上することで、羽ばたき装置は障害物に阻まれることなく家庭内を隈なく自由に移動することができる。また、浮上することで比較的小型の羽ばたき装置でも高い段差や障害物を乗り越えることができる。

【0572】

そして、上述したように、羽ばたき装置は空中で静止（ホバリング）等が可能であるので、家庭などのように比較的狭く障害物の多い空間を移動するのに適し

ている。これにより、たとえば家庭内の状況を把握するなどの所定の作業を容易に行うことができる。

【0573】

さらに、昆虫の自由な飛行に見られるように、羽の偏角や捻り角等を変化させることで、すばやく羽ばたき装置の移動方向を変えることができ、たとえばヘリコプターよりも機動性に優れている。

【0574】

また、羽ばたき装置は、その浮上力がその体積に直接は依存しないため、気球などのように浮上力が体積に比例する移動装置に比べて小型化に適している。

【0575】

さらに、この羽ばたき装置は屋外においても利用することができ、屋外の地形や障害物に邪魔されることなく移動することができ、たとえば、災害地等において人が容易に近づけない場所の情報収集を容易に行うことができる。

【0576】

今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した説明ではなくて特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の製造方法の概略を表す説明図である。

【図2】 本発明の実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の主要な構成要素を示す図である。

【図3】 本発明の実施の形態の羽の上に想定された点の運動を示すグラフである。

【図4】 本発明の実施の形態の羽の上に想定されたもう1点の運動を示すグラフである。

【図5】 本発明の実施の形態の羽の要素分割の上面図である。

【図6】 本発明の実施の形態の空間の要素分割の上面図である。

【図 7】 本発明の実施の形態の空間の要素分割の斜視図である。

【図 8】 本発明の実施の形態の羽の要素におけるコネクティビティを説明するための図である。

【図 9】 本発明の実施の形態の羽の周囲の流れを表す流体の数値モデルを可視化した図である。

【図 10】 本発明の実施の形態の羽に及ぼされる浮上力の時系列の変化を表すグラフである。

【図 11】 本発明の実施の形態の羽の駆動トルクと時間との関係を表すグラフである。

【図 12】 本発明の実施の形態の羽の剛性と浮上力との関係を表すグラフである。

【図 13】 本発明の実施の形態の羽の剛性とトルク効率との関係を表すグラフである。

【図 14】 本発明の実施の形態の羽の剛性とエネルギー効率との関係を表すグラフである。

【図 15】 本発明の実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の第 1 の例を示す図である。

【図 16】 本発明の実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の第 2 の例を示す図である。

【図 17】 本発明の実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の第 3 の例を示す図である。

【図 18】 本発明の実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の第 4 の例を示す図である。

【図 19】 本発明の実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の第 5 の例を示す図である。

【図 20】 本発明の実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の第 6 の例を示す図である。

【図 21】 本発明の実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の第 7 の例を示す図である。

【図 2 2】 本発明の実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の第 8 の例を示す図である。

【図 2 3】 本発明の実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の第 9 の例を示す図である。

【図 2 4】 本発明の実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の第 1 0 の例の羽ばたき角 θ と位置 P との関係を示すグラフである。

【図 2 5】 本実施の形態の流体・構造連成数値モデルの作成方法により算出された流体・構造連成数値モデルに感度解析による変更を加えた羽ばたき飛行ロボットの製造プロセスを表わす図である。

【図 2 6】 本実施の形態に係る、実際の昆虫の羽根における梁構造および膜構造の状態を示す図である。

【図 2 7】 本実施の形態に係る、羽根の形状の計測手法を説明するための図である。

【図 2 8】 本実施の形態に係る、羽根の厚みの分布を表わす図である。

【図 2 9】 本実施の形態に係る、羽根におけるほぼ平坦な領域を表わす図である。

【図 3 0】 本実施の形態に係る、羽根における代表点での剛性を測定する 1 つの手法を説明するための図である。

【図 3 1】 本実施の形態に係る、羽根における代表点での剛性を測定するさらに他の手法を説明するための図である。

【図 3 2】 本実施の形態に係る、流体のメッシュの作成方法を説明するための図である。

【図 3 3】 本実施の形態に係る、流体のメッシュの外形線を表わす図である。

【図 3 4】 本実施の形態に係る、流体・構造連成数値モデルのうち流体の挙動を示す図である。

【図 3 5】 本実施の形態に係る、流体・構造連成数値モデルが羽ばたきた場合の羽根の支点にかかる支点反力の推移を示す図である。

【図 3 6】 本発明の実施の形態に係る、羽ばたき飛行ロボットの概略構成

を示す図である。

【図 3 7】 本実施の形態に係る、感度解析の手法を説明するための図である。

【図 3 8】 本実施の形態に係る、羽根の形状を補間する手法を説明するための図である。

【図 3 9】 本実施の形態に係る、実構造等価数値モデルの具体例を説明するための図である。

【図 4 0】 本実施の形態に係る、実構造等価数値モデルの具体例を説明するための図である。

【図 4 1】 本実施の形態に係る、実構造等価数値モデルの具体例を説明するための図である。

【図 4 2】 本実施の形態に係る、実構造等価数値モデルの具体例を説明するための図である。

【図 4 3】 本実施の形態に係る、実構造等価数値モデルの具体例を説明するための図である。

【図 4 4】 本実施の形態に係る、実構造等価数値モデルにかかる駆動トルクを説明するための図である。

【図 4 5】 実施の形態 2 に係る、流体のメッシュの作成方法を説明するための図である。

【図 4 6】 実施の形態 2 に係る、流体のメッシュの外形線を表わす図である。

【図 4 7】 実施の形態 2 に係る、流体・構造連成数値モデルが羽ばたきた場合の羽根の支点にかかる支点反力の推移を示す図である。

【図 4 8】 実施の形態 2 に係る、実構造等価数値モデルの具体例を説明するための図である。

【図 4 9】 実施の形態 2 に係る、実構造等価数値モデルの具体例を説明するための図である。

【図 5 0】 実施の形態 2 に係る、実構造等価数値モデルにかかる駆動トルクを説明するための図である。

【図 5 1】 本発明の実施の形態 1 に係る羽ばたき装置を示す図であり、（a）はその部分正面図であり、（b）はその部分側面図である。

【図 5 2】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽ばたき運動と羽ばたき運動の位相との関係を示すグラフである。

【図 5 3】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽ばたき動作の第 1 の状態を示す図である。

【図 5 4】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置における羽ばたき動作の第 2 の状態を示す図である。

【図 5 5】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置における羽ばたき動作の第 3 の状態を示す図である。

【図 5 6】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽ばたき動作の第 4 の状態を示す図である。

【図 5 7】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽ばたき動作の第 5 の状態を示す図である。

【図 5 8】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽ばたき動作の第 6 の状態を示す図である。

【図 5 9】 実施の形態において、羽ばたき装置における羽ばたき動作の第 7 の状態を示す図である。

【図 6 0】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置における羽ばたき動作の第 8 の状態を示す図である。

【図 6 1】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の変形例を示す正面模式図である。

【図 6 2】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の他の変形例を示す正面模式図である。

【図 6 3】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置のさらに他の変形例を示す正面模式図である。

【図 6 4】 実施の形態の図 5 1 に示す羽ばたき浮上移動装置の構造を示す平面模式図である。

【図 6 5】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽に作用する力および各

角度のそれぞれの羽ばたき運動の位相に対する変化を示す第 1 のグラフである。

【図 6 6】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽に作用する力および各角度のそれぞれの羽ばたき運動の位相に対する変化を示す第 2 のグラフである。

【図 6 7】 実施の形態 2 の羽ばたき浮上移動装置の構造を示す正面図である。

【図 6 8】 実施の形態 2 の羽ばたき浮上移動に用いられるアクチュエータを説明するための超音波モータを示す一平面図である。

【図 6 9】 実施の形態の羽ばたき浮上移動に用いられるアクチュエータを説明するための超音波モータを示す一側面図である。

【図 7 0】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の、図 6 8 および図 6 9 に示された超音波モータの動作を説明するための図である。

【図 7 1】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置に用いられるアクチュエータの構成を説明するための第 1 の図である。

【図 7 2】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置に用いられるアクチュエータの構成を説明するための第 2 の図である。

【図 7 3】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽を示す拡大斜視図である。

【図 7 4】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽のストローク角 θ と偏角 α を示す図である。

【図 7 5】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽の捻り角 β を示す図である。

【図 7 6】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽の打ち下ろし動作を示す図である。

【図 7 7】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽の打ち上げ動作を示す図である。

【図 7 8】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽の羽ばたき動作の第 1 の状態を示す図である。

【図 7 9】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽の羽ばたき動作の第 2 の状態を示す図である。

【図 8 0】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽の羽ばたき動作の第 3 の状態を示す図である。

【図 8 1】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽の羽ばたき動作の第 4 の状態を示す図である。

【図 8 2】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽のストローク角 θ および捻り角 β の時間依存性を示す第 1 のグラフである。

【図 8 3】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽のストローク角 θ および捻り角 β の時間依存性を示す第 2 のグラフである。

【図 8 4】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置のデータの流れを示すフローチャートである。

【図 8 5】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の主要構成部分を示すブロック図である。

【図 8 6】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の羽の羽ばたきのトルク、羽の移動（ストローク角 θ ）および支持反力の時間変化を示すグラフである。

【図 8 7】 羽ばたき浮上制御の制御関数を説明するための説明図である。

【図 8 8】 左羽の羽ばたかせ方の変化と、それに伴って起きる浮上状態の変化とを対応づけた対応表の図である。

【図 8 9】 羽ばたき浮上の基本動作を実現するための羽ばたかせ方のパターンを示した対応表の図である。

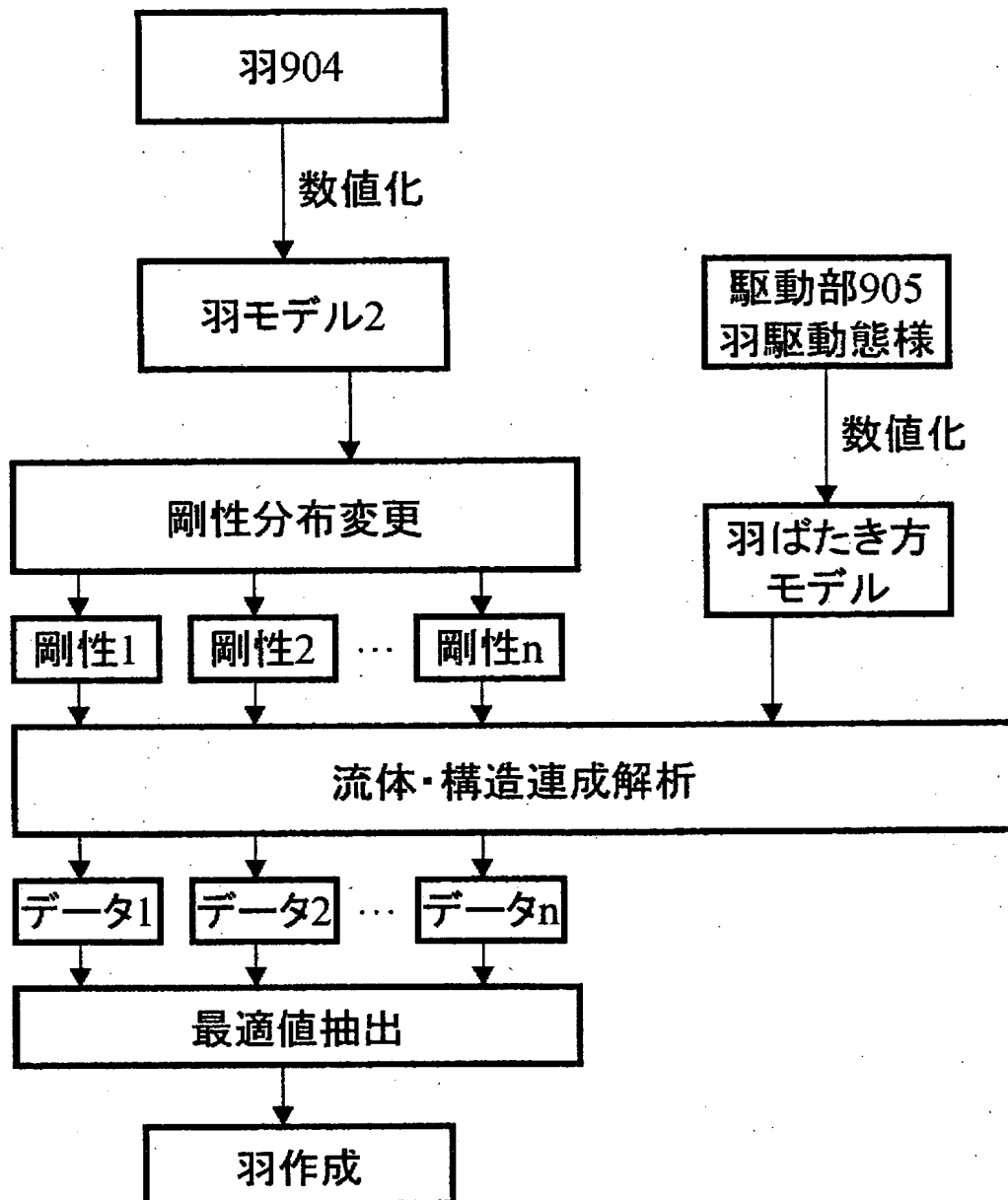
【図 9 0】 実施の形態の羽ばたき浮上移動装置の前羽軸と後羽軸の先端方向が、互いに平行な位置から角度 ε だけ外側を向いている場合の、2 本の羽軸の関係を示す図である。

【符号の説明】

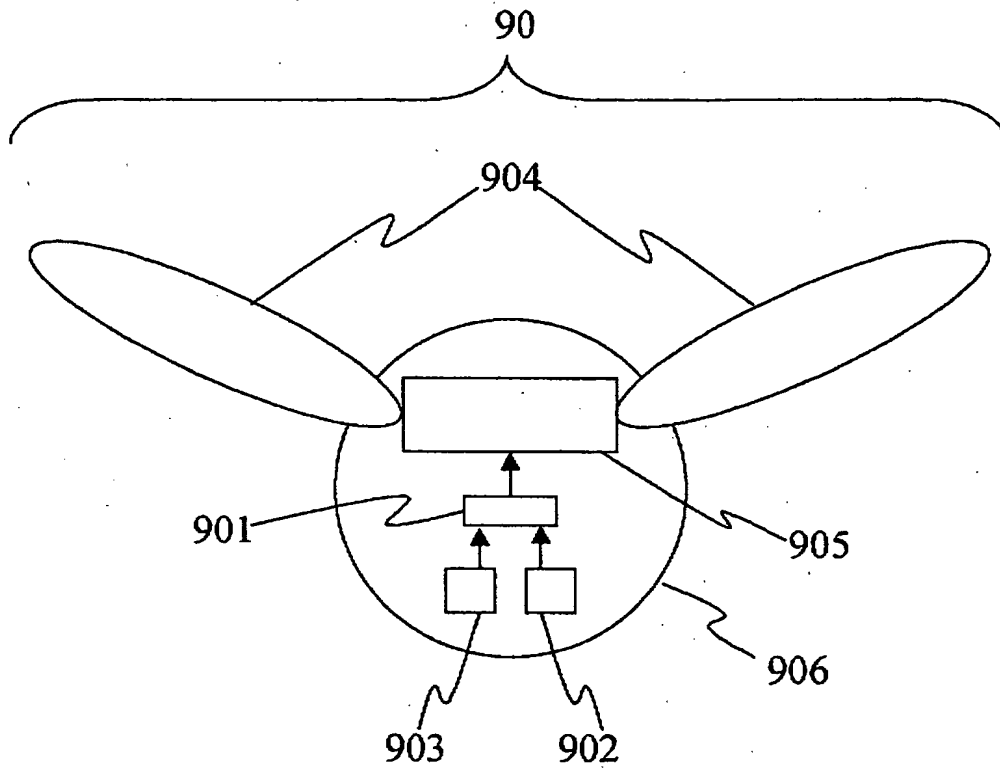
9 0 羽ばたき浮上移動装置、9 0 1 制御部、9 0 2 指示受信部、9 0 3 センサー部、9 0 4 羽、9 0 5 駆動部、9 0 6 胴体。

【書類名】 図面

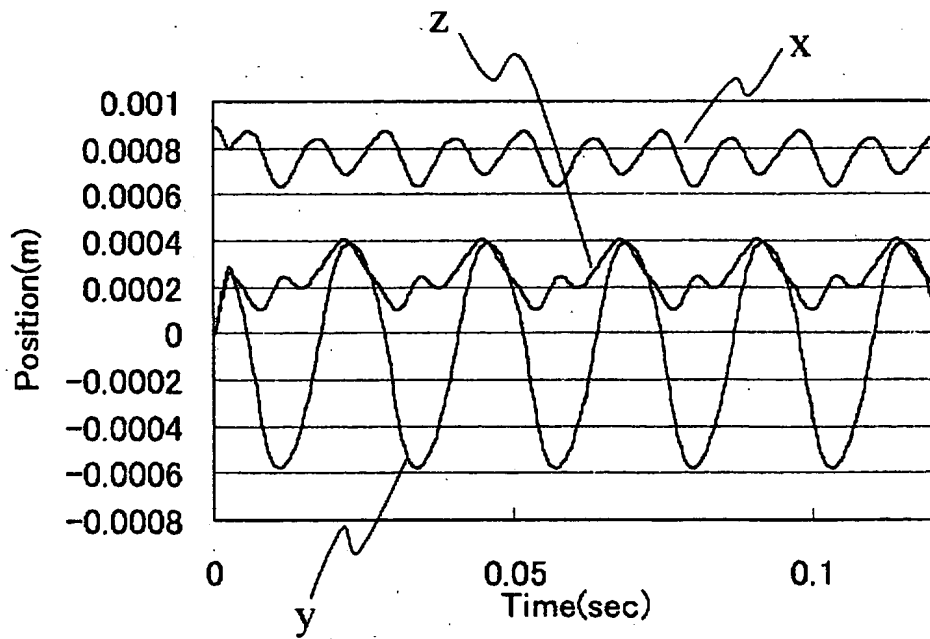
【図 1】



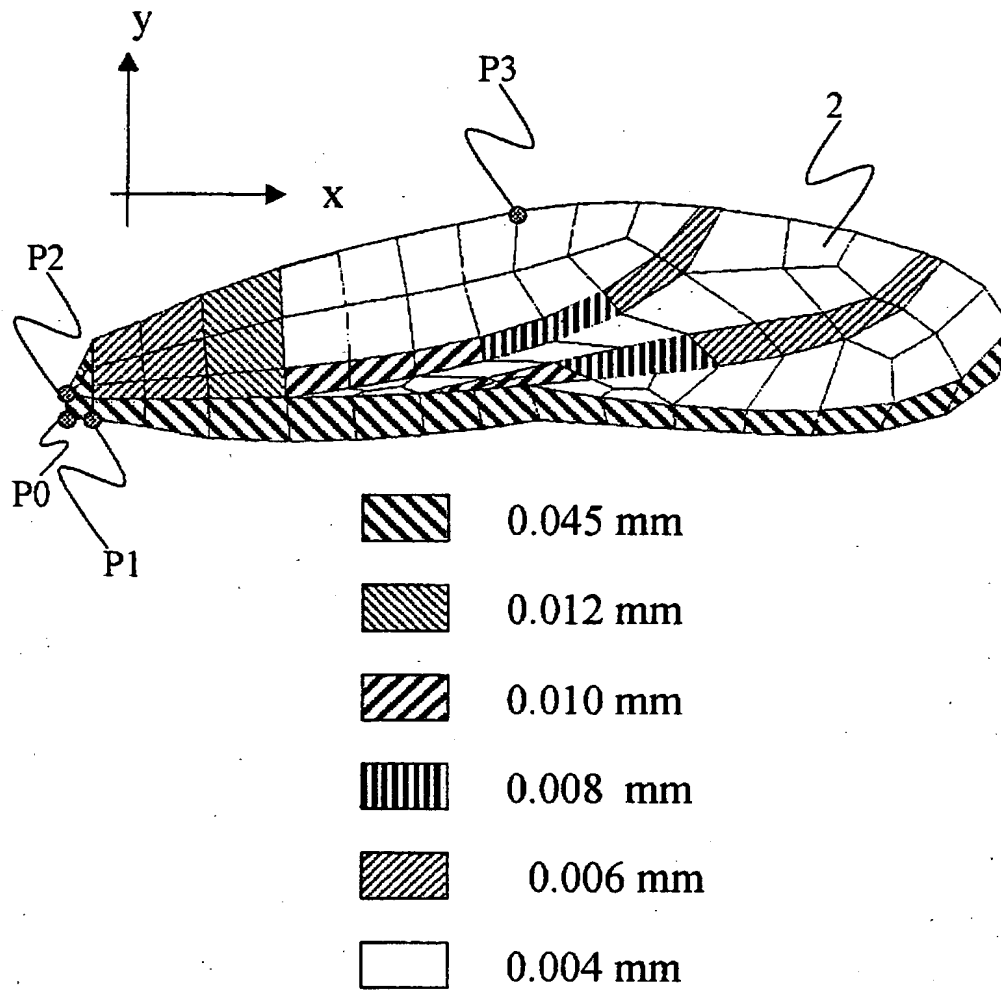
【図 2】



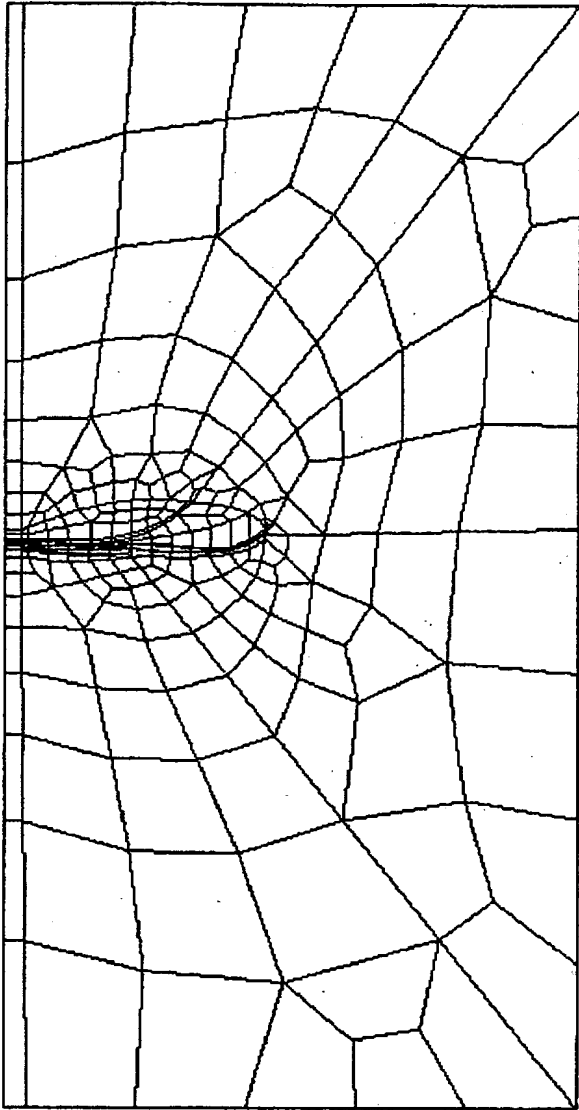
【図 3】



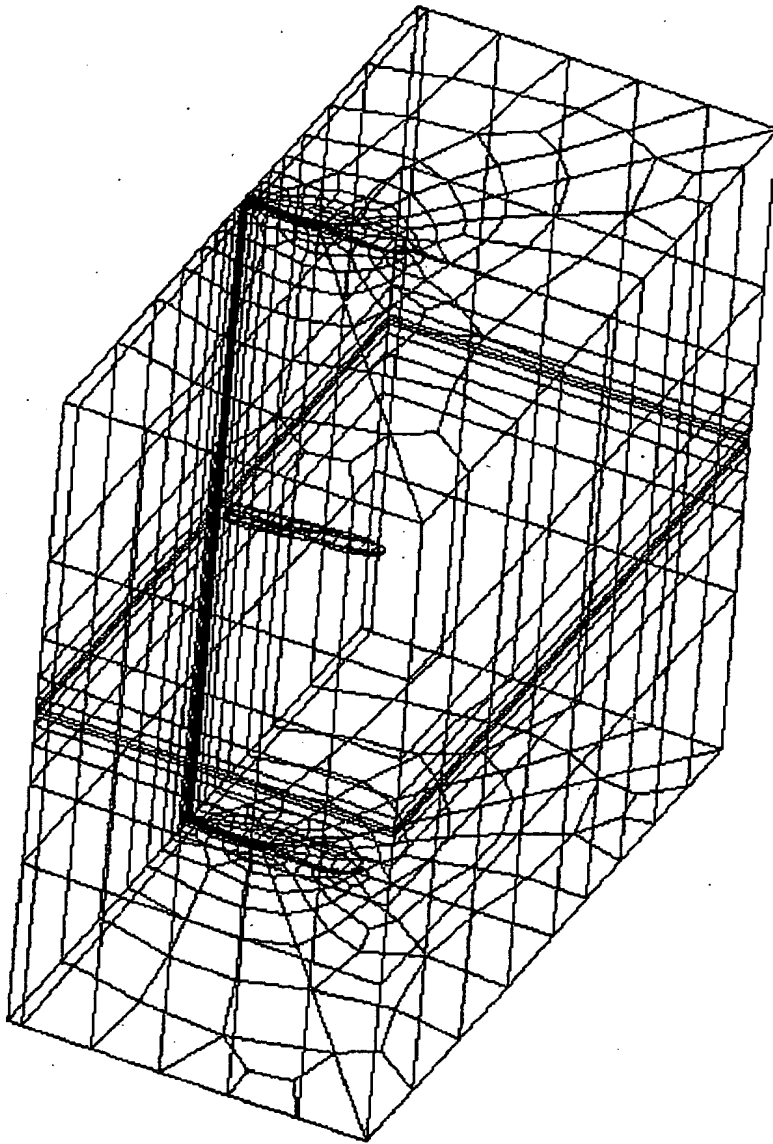
【図5】



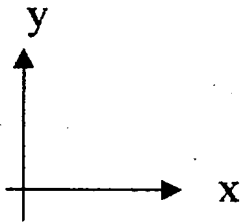
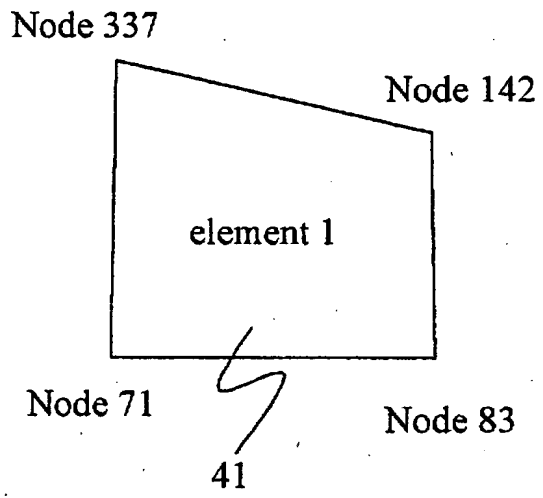
【図 6】



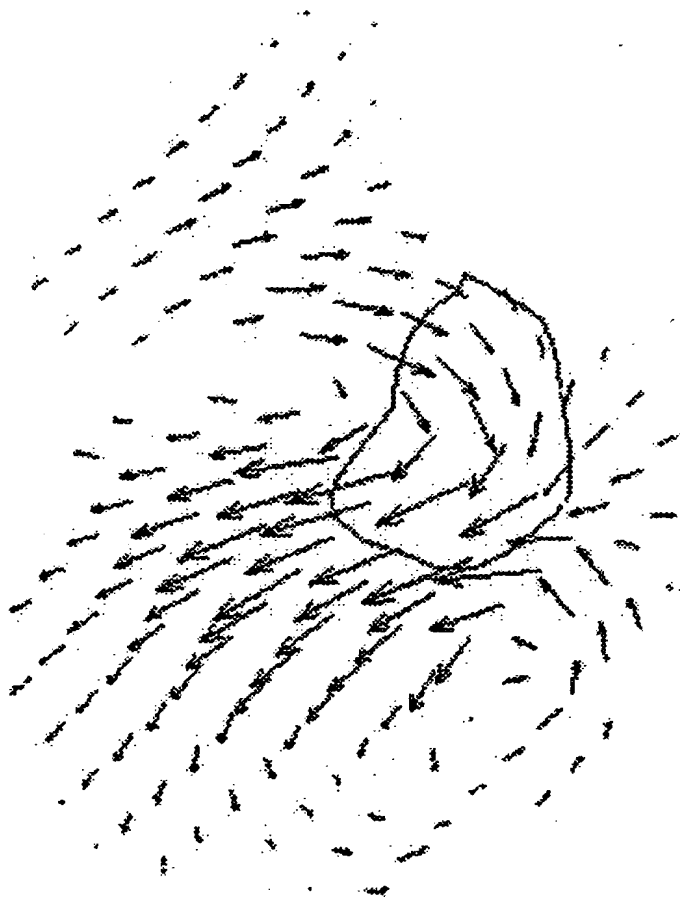
【図7】



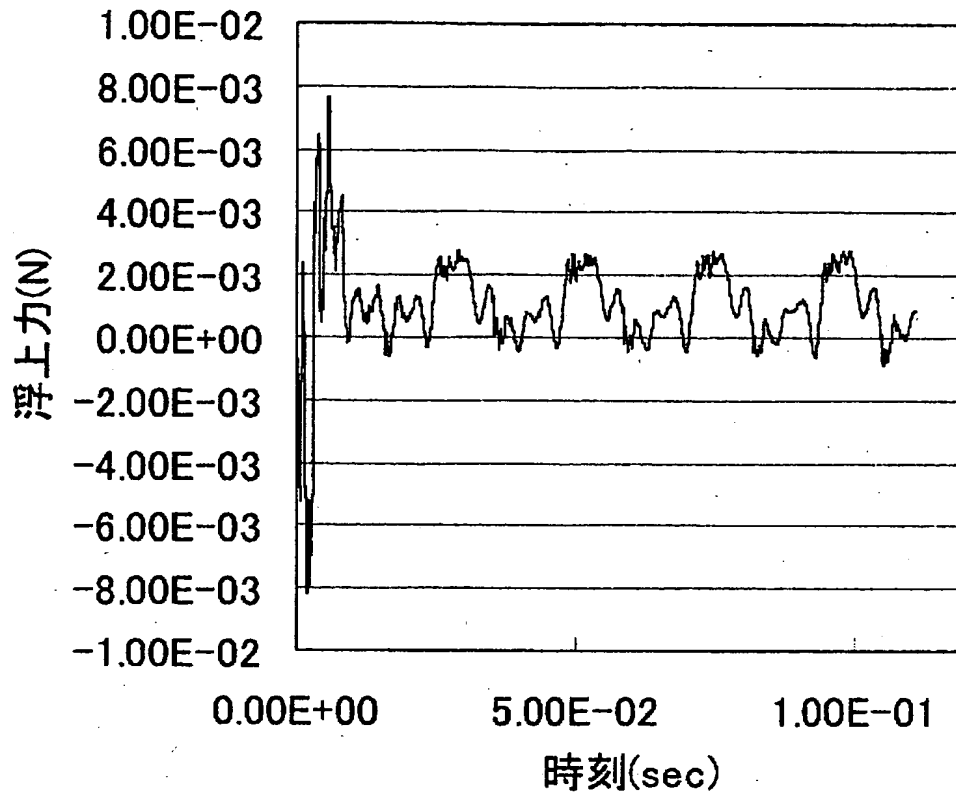
【図 8】



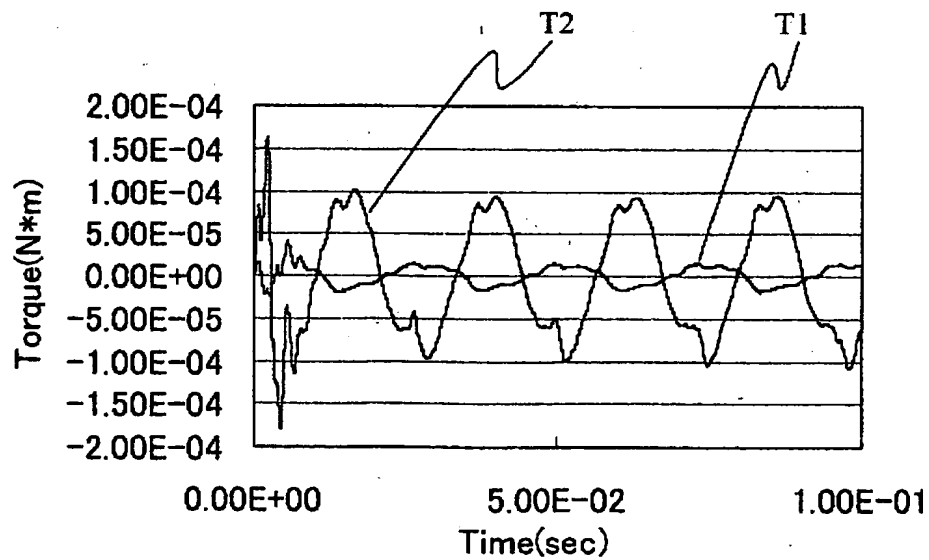
【図 9】



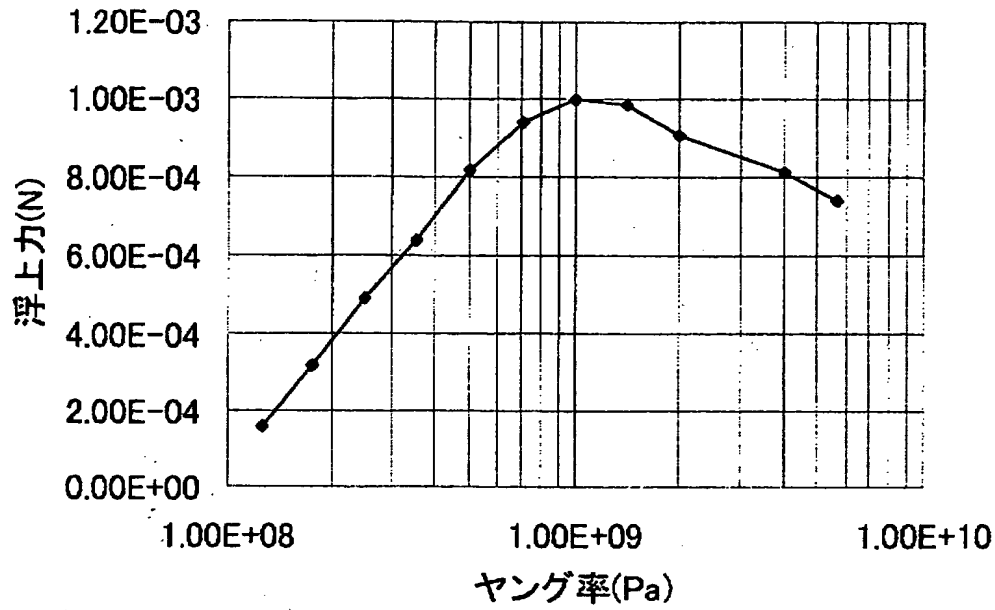
【図 1 0】



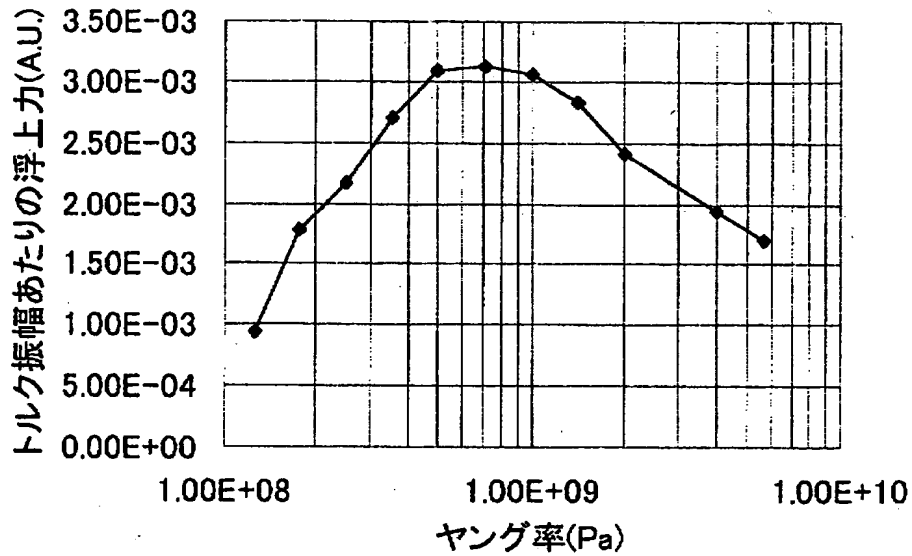
【図 1 1】



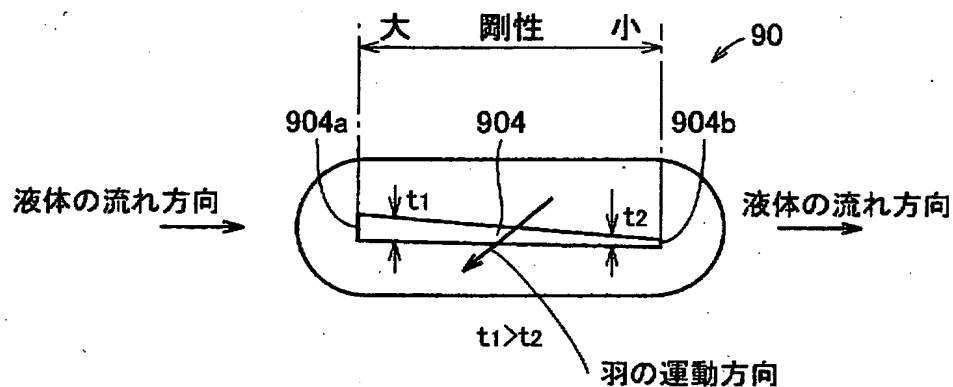
【図 1 2】



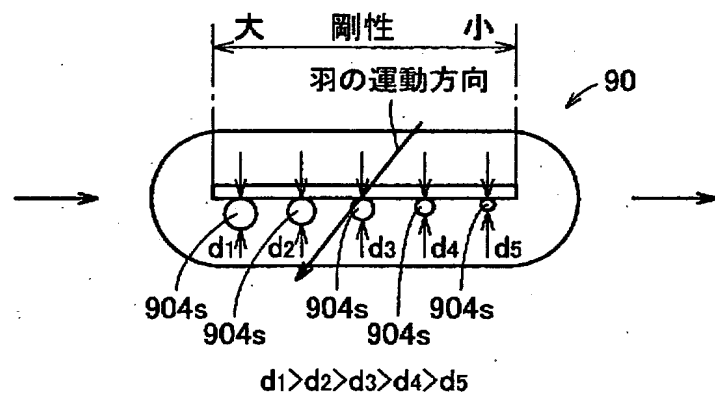
【図 1 3】



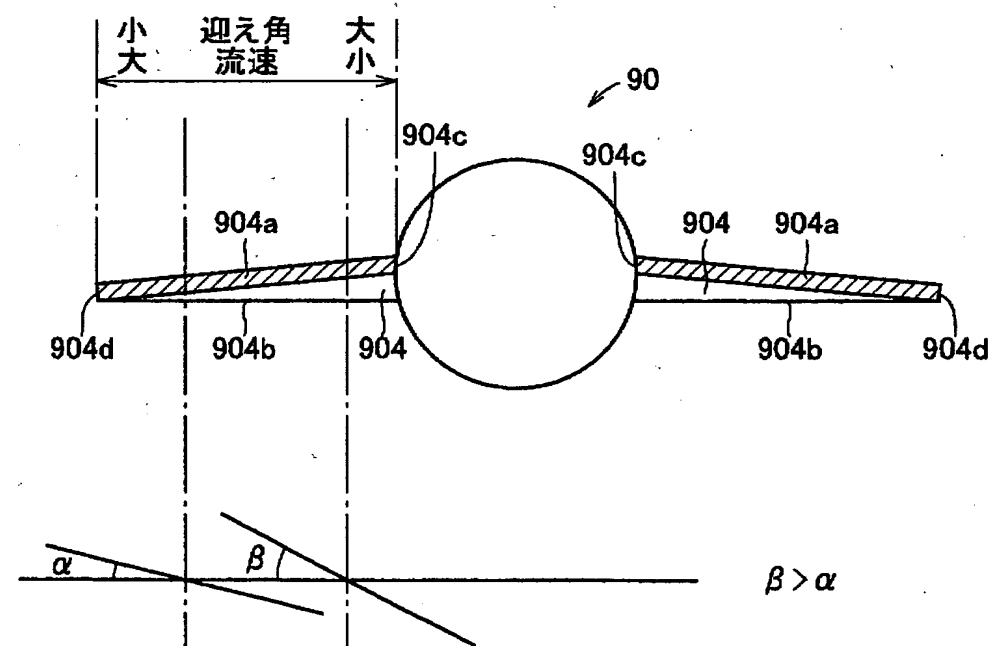
【図 16】



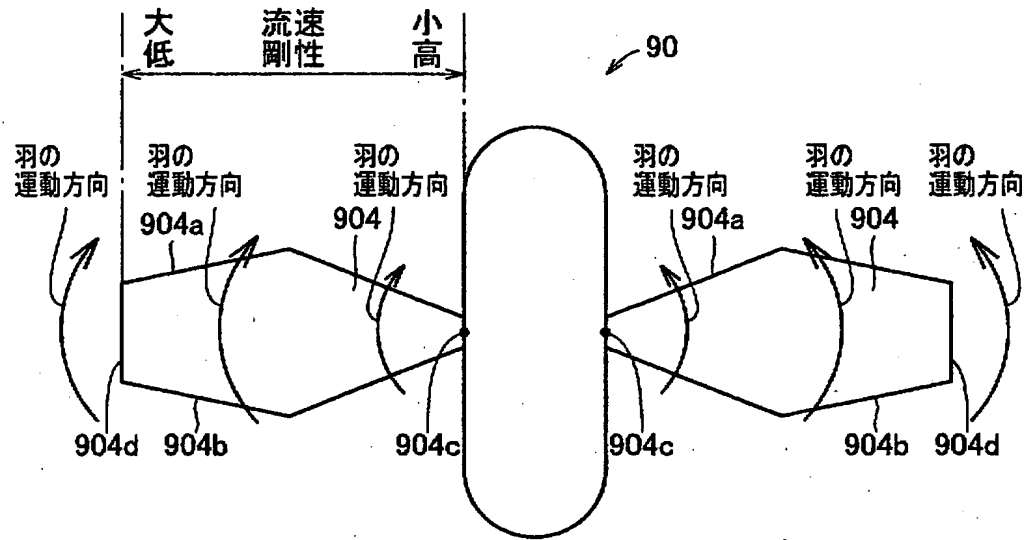
【図 17】



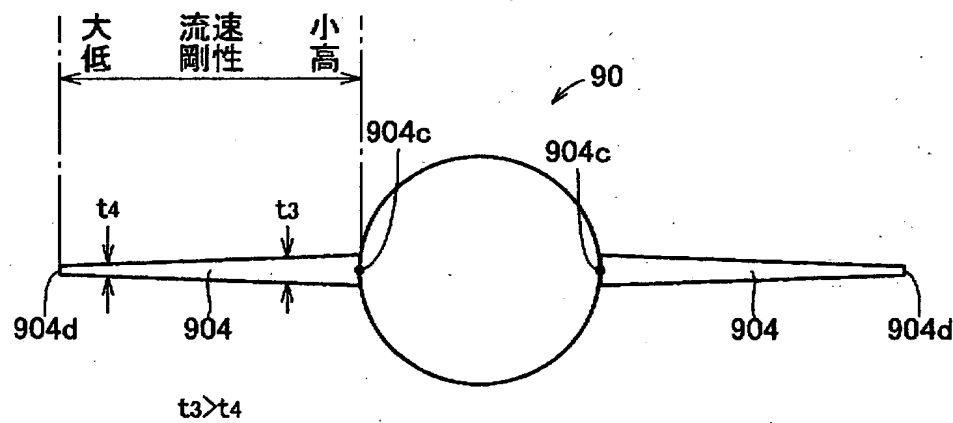
【図 18】



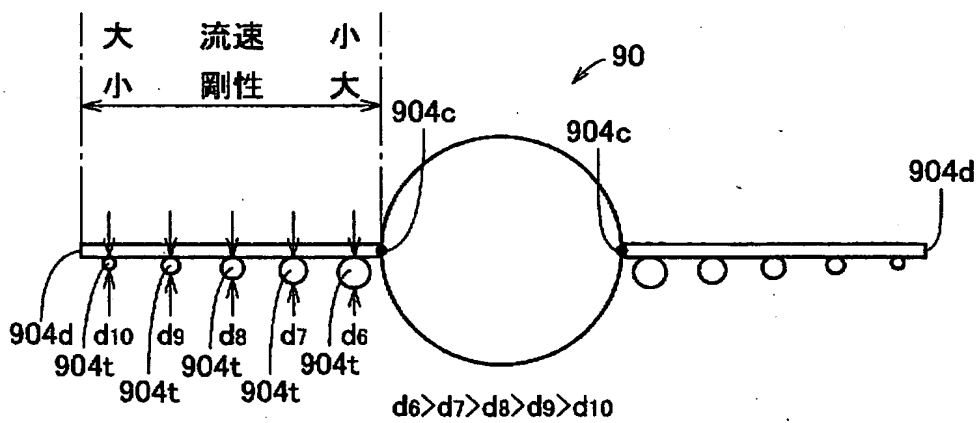
【図 1 9】



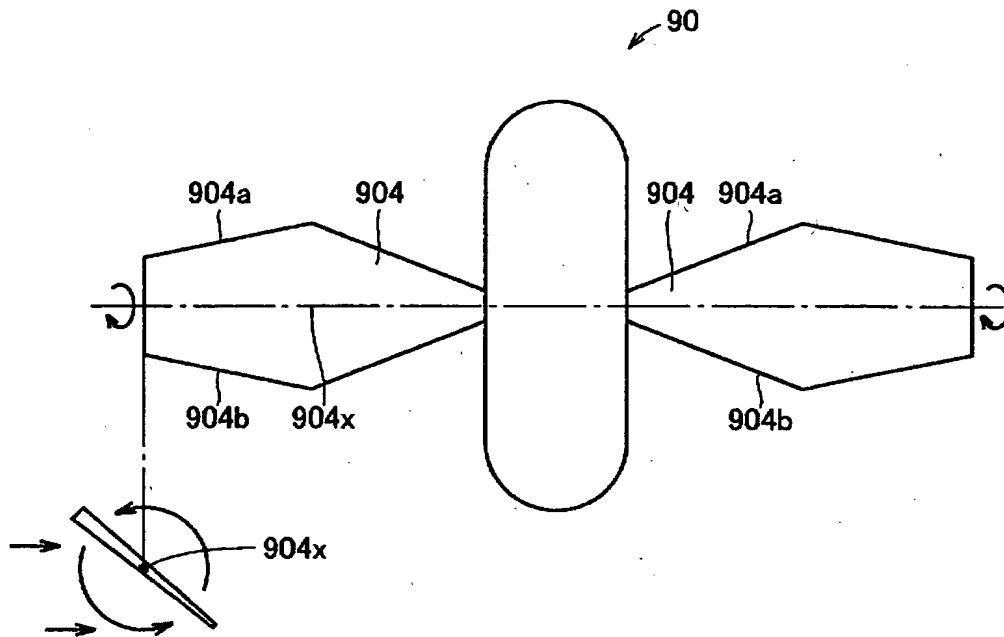
【図 2 0】



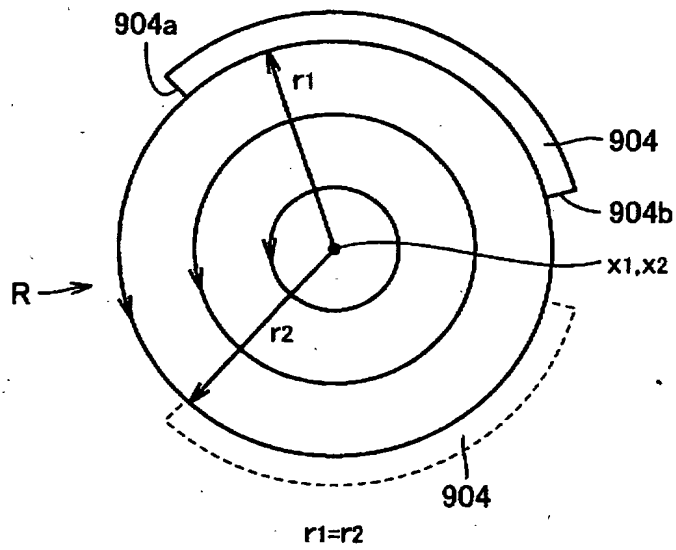
【図 2 1】



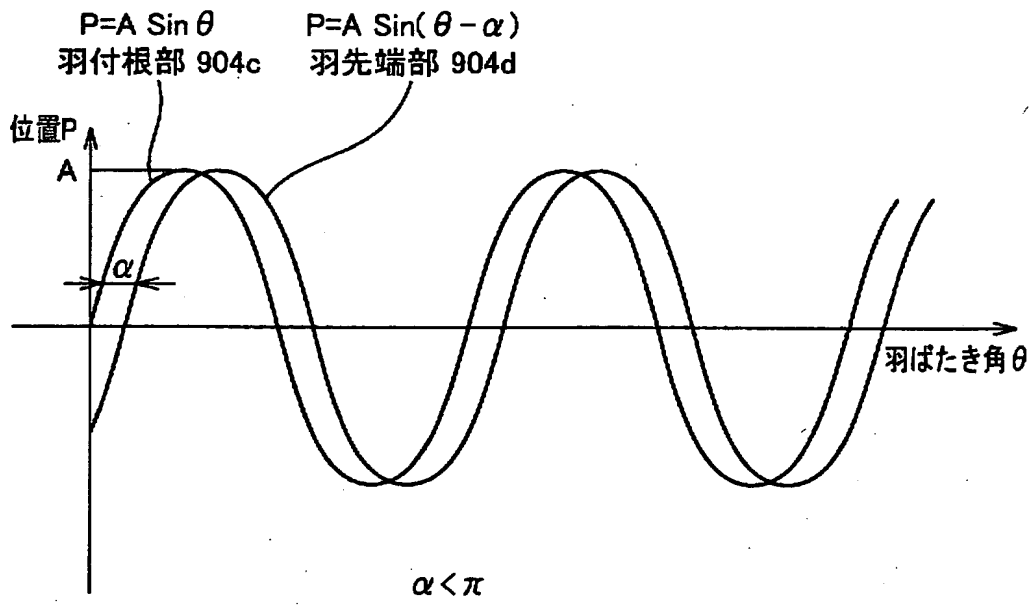
【図 2 2】



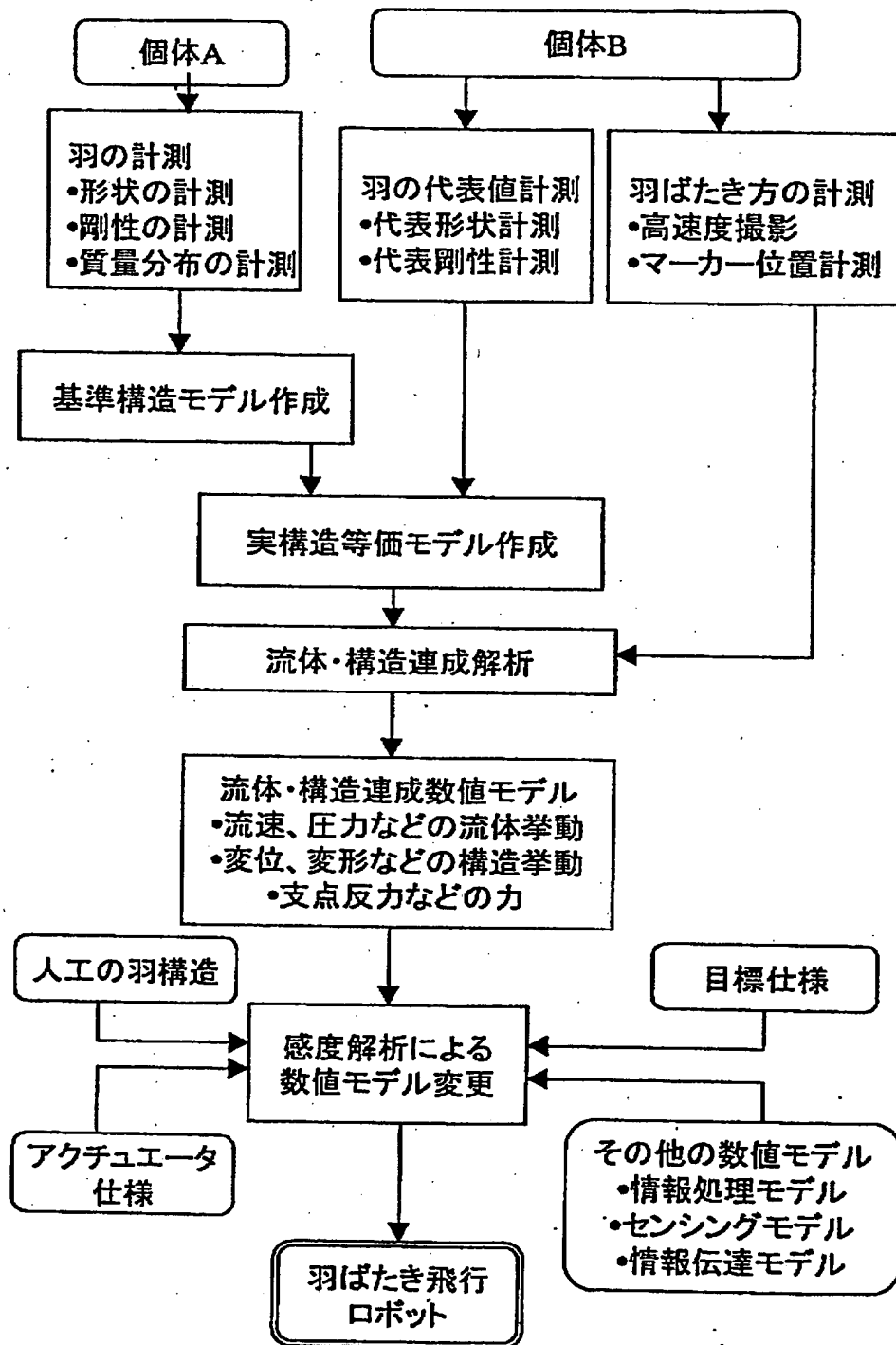
【図 2 3】



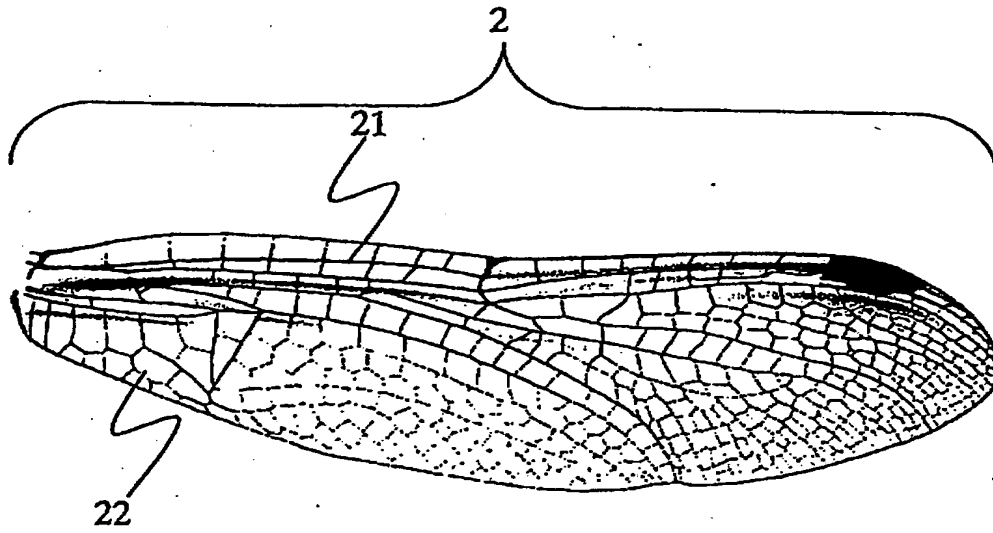
【図 2 4】



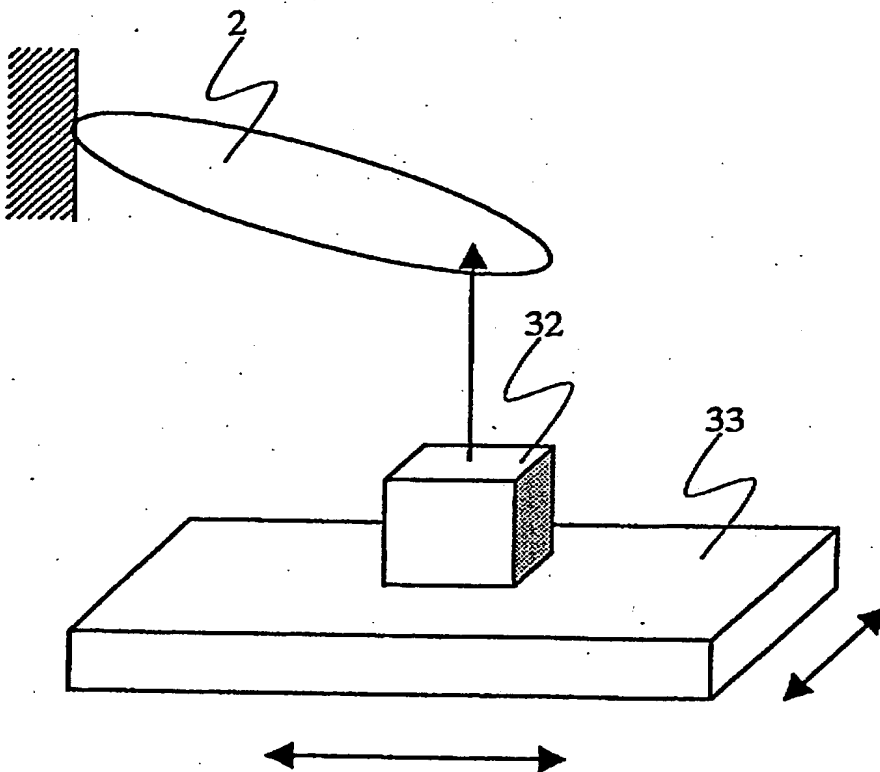
【図 25】



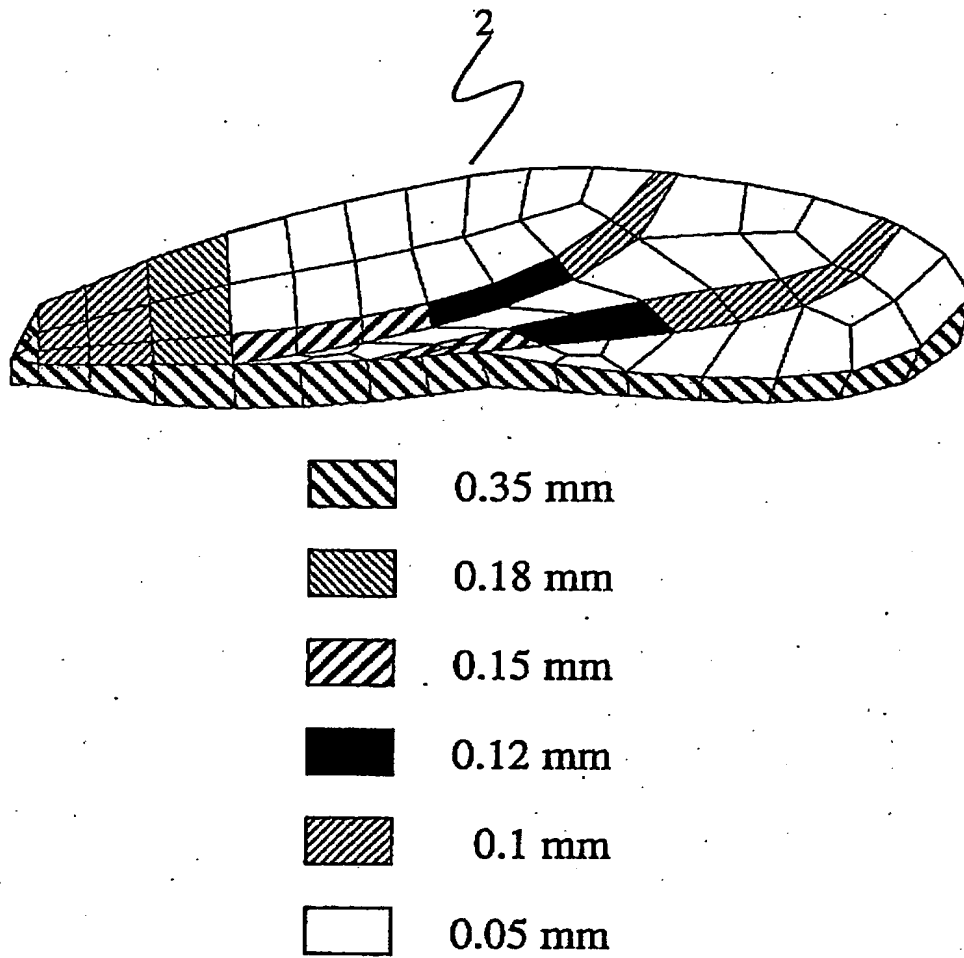
【図 26】



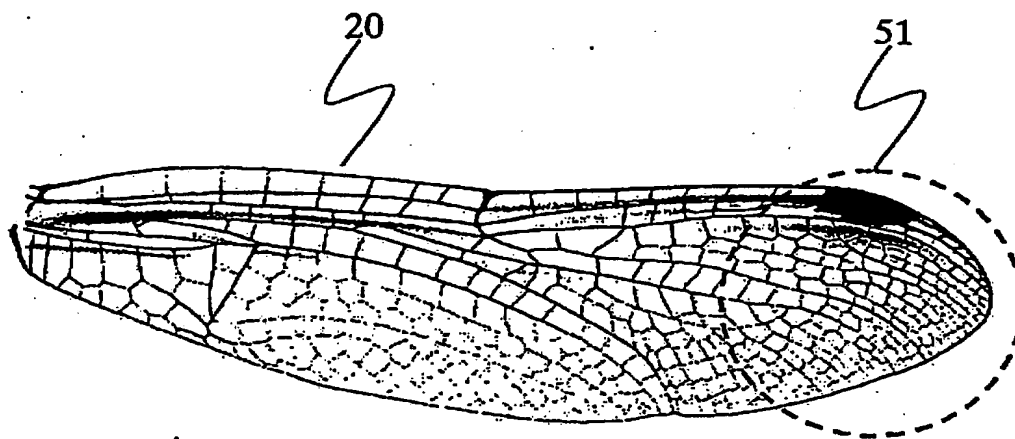
【図 27】



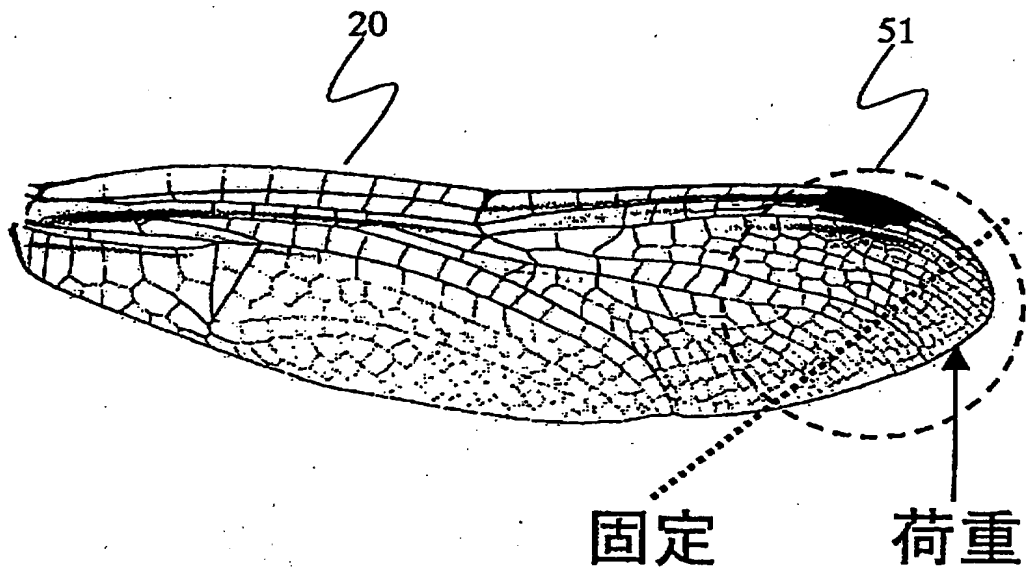
【図 28】



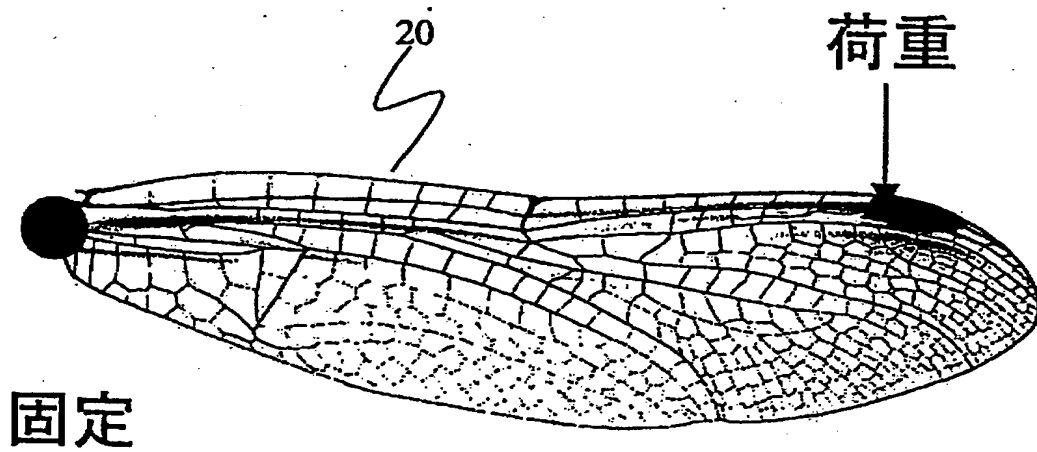
【図 29】



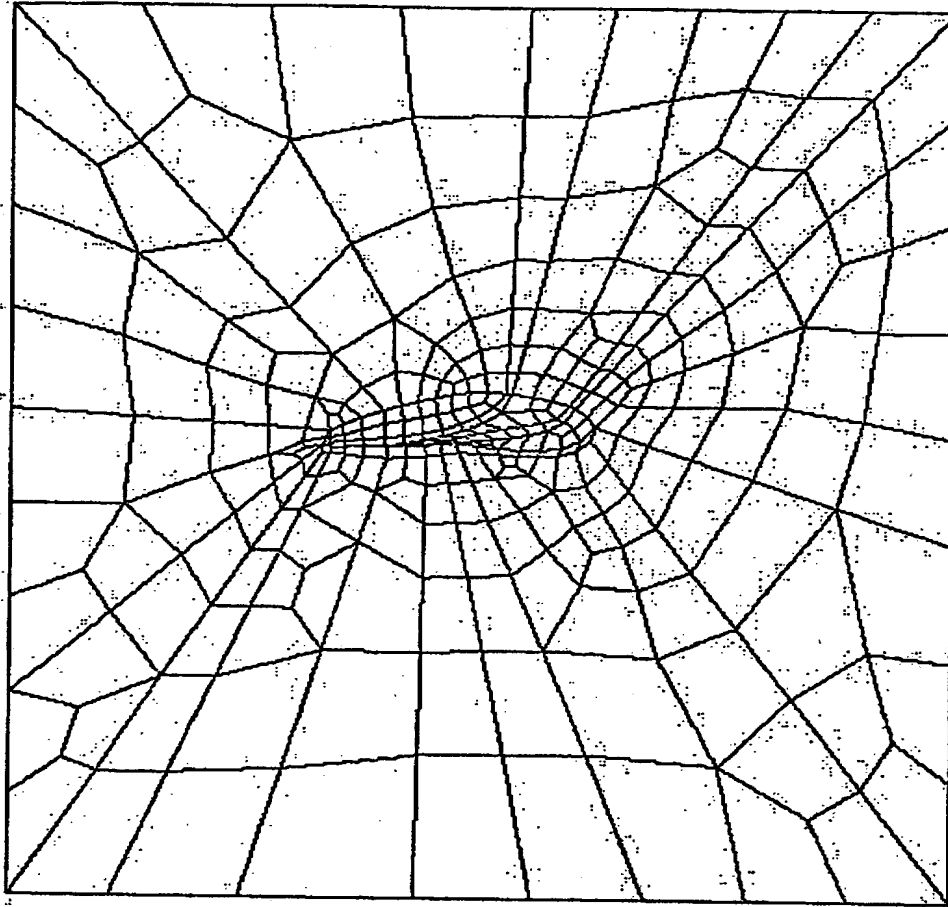
【図 3 0】



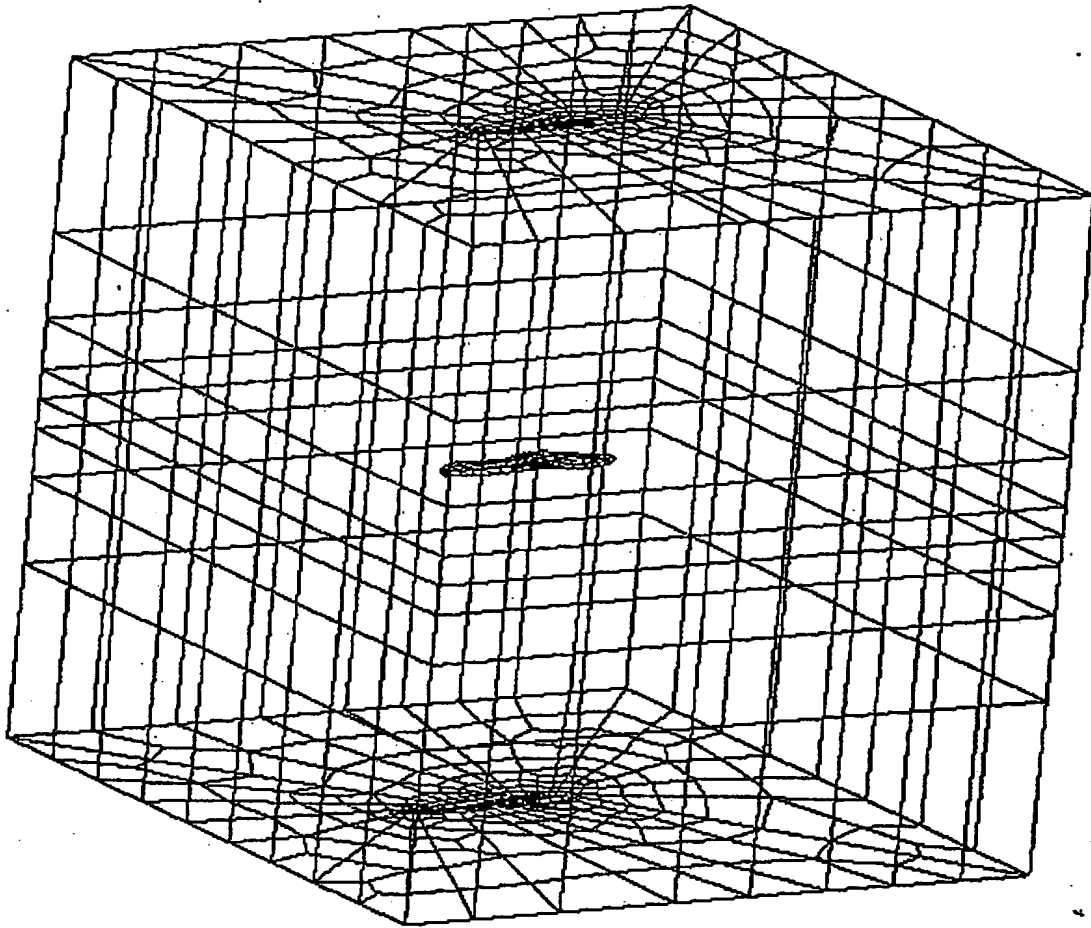
【図 3 1】



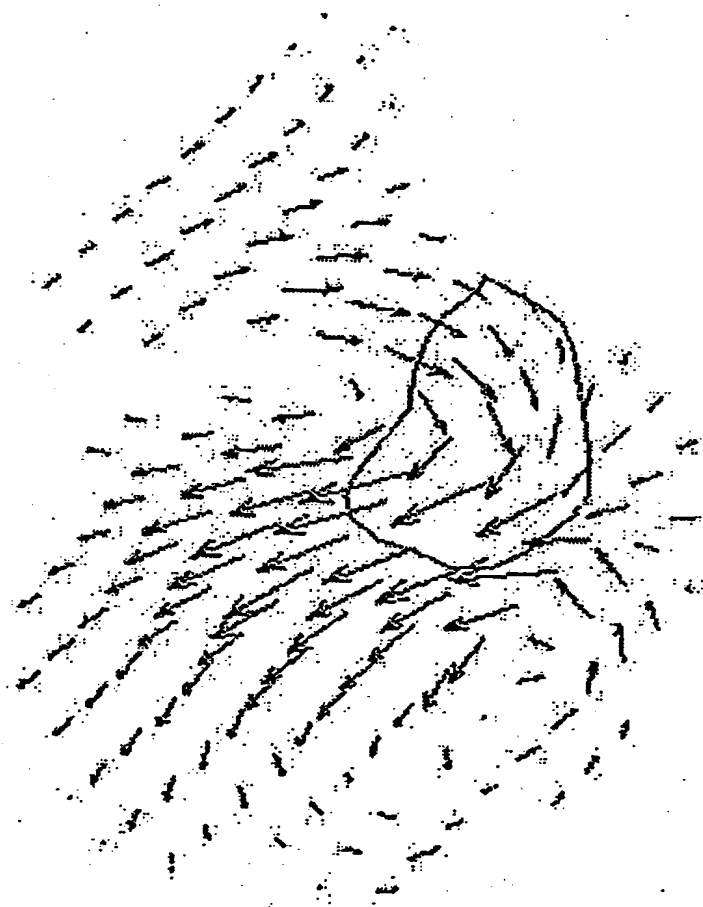
【図 32】



【図 3 3】

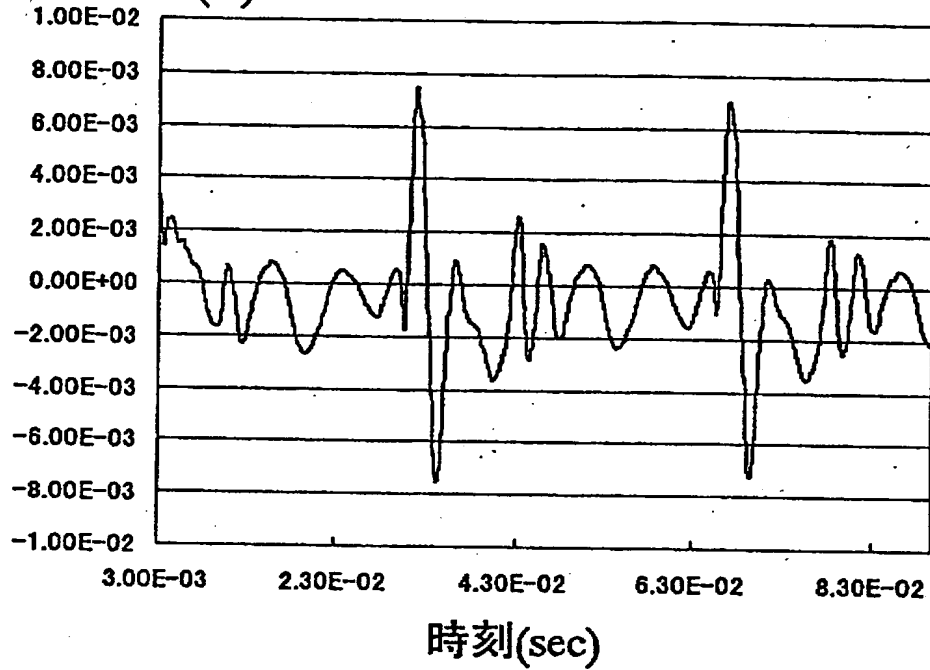


【図 34】

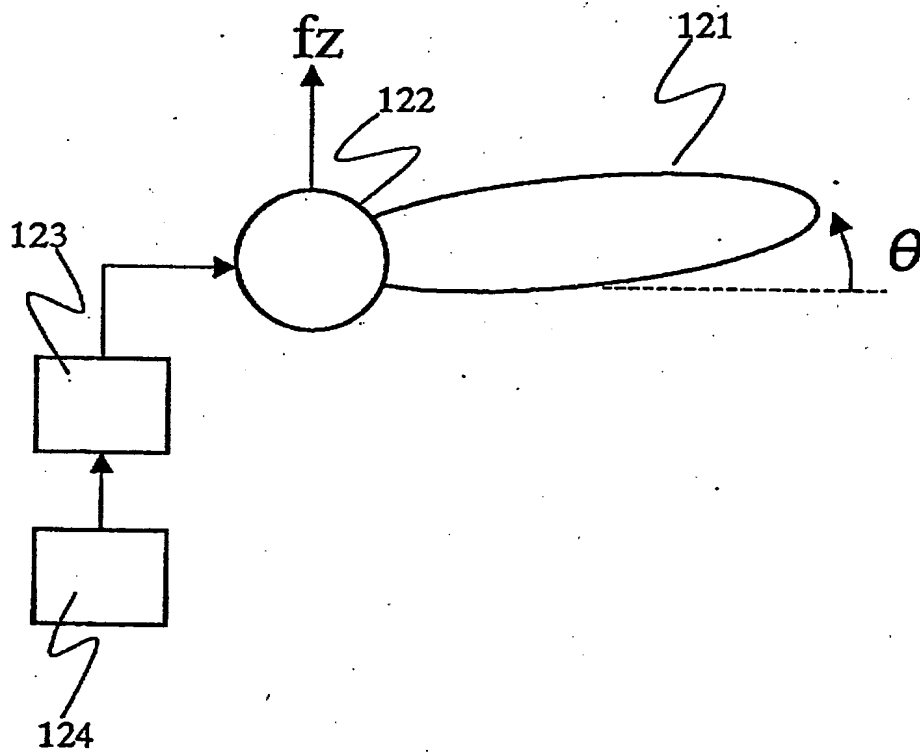


【図 3 5】

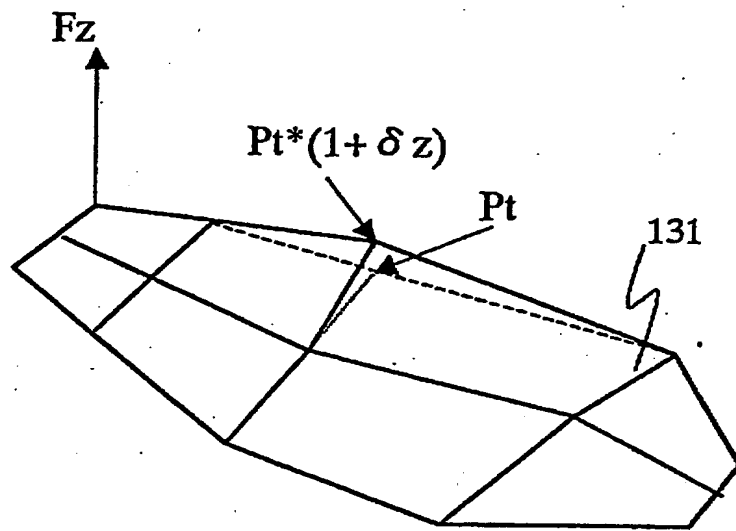
支点反力の
垂直成分(N)



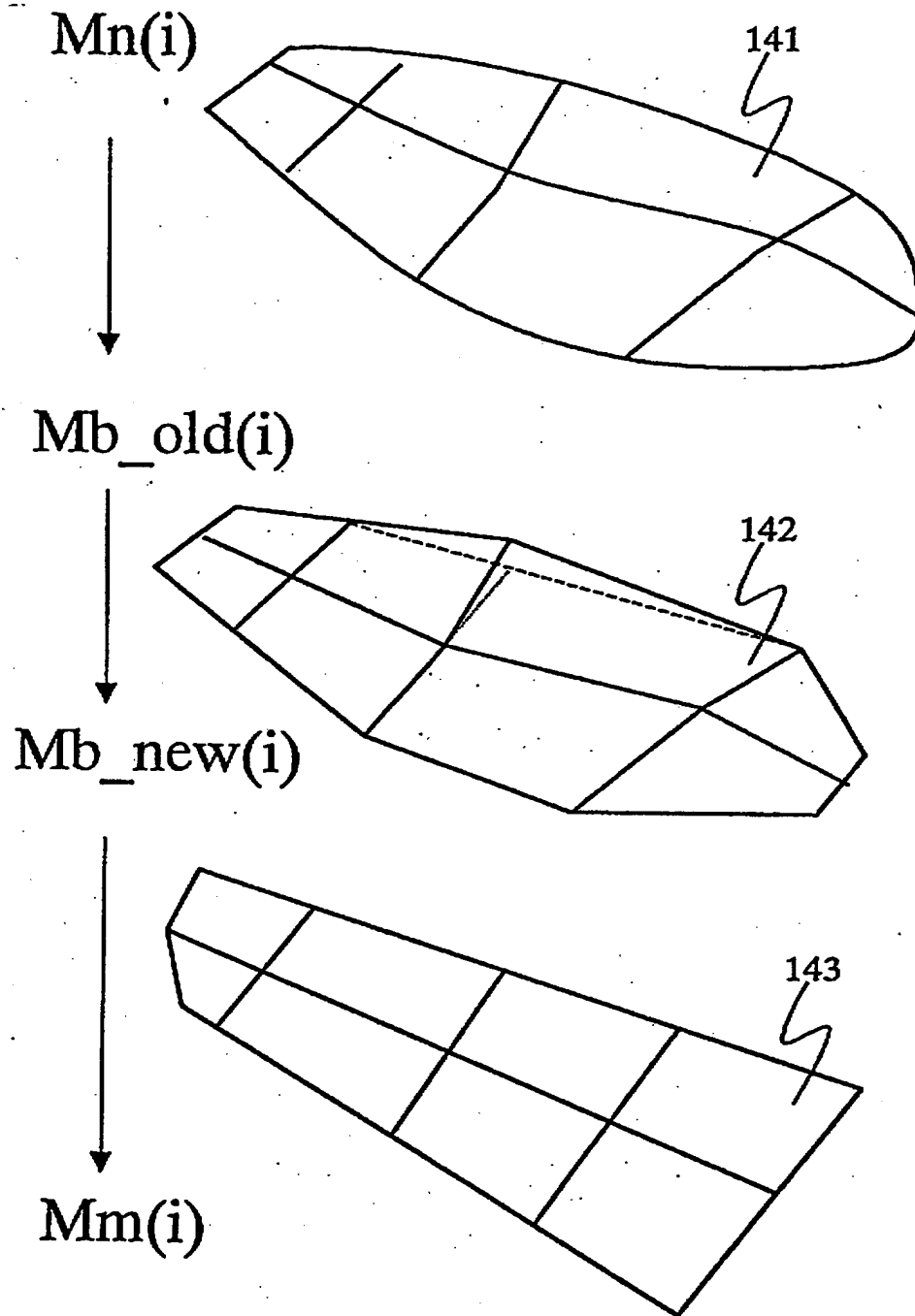
【図 3 6】



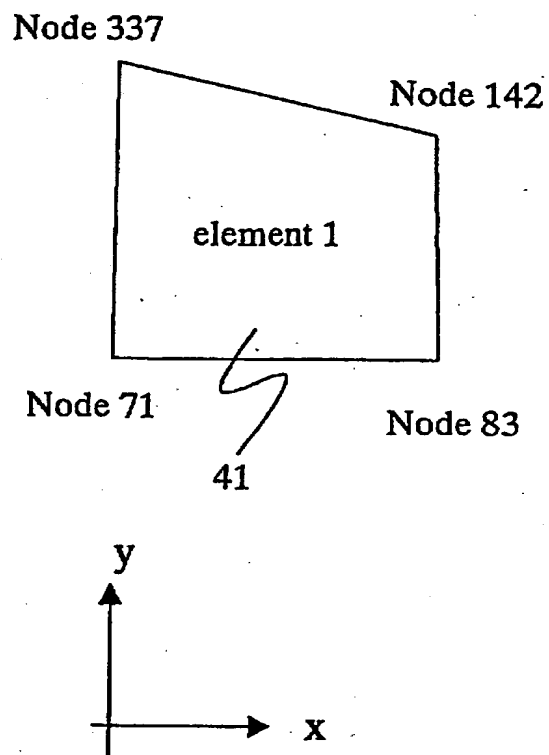
【図 3 7】



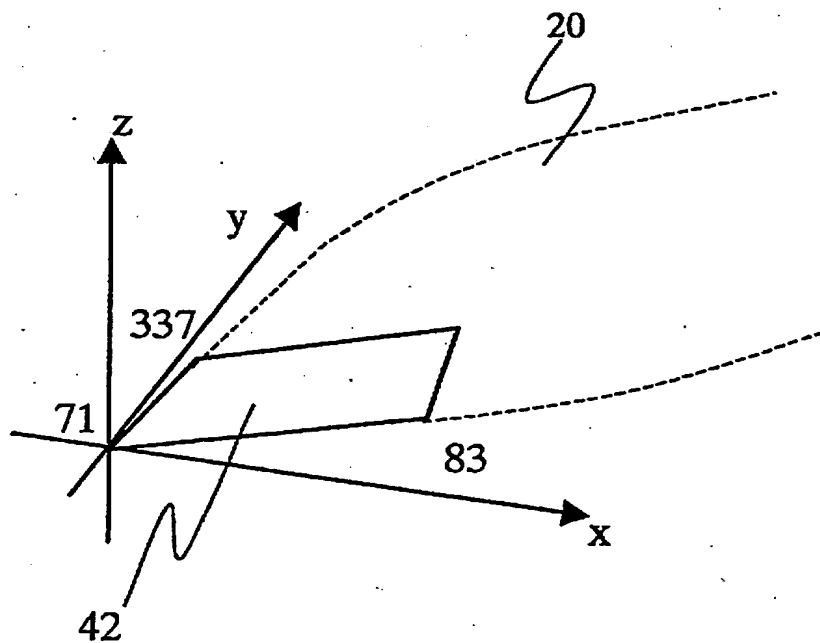
【図 3 8】



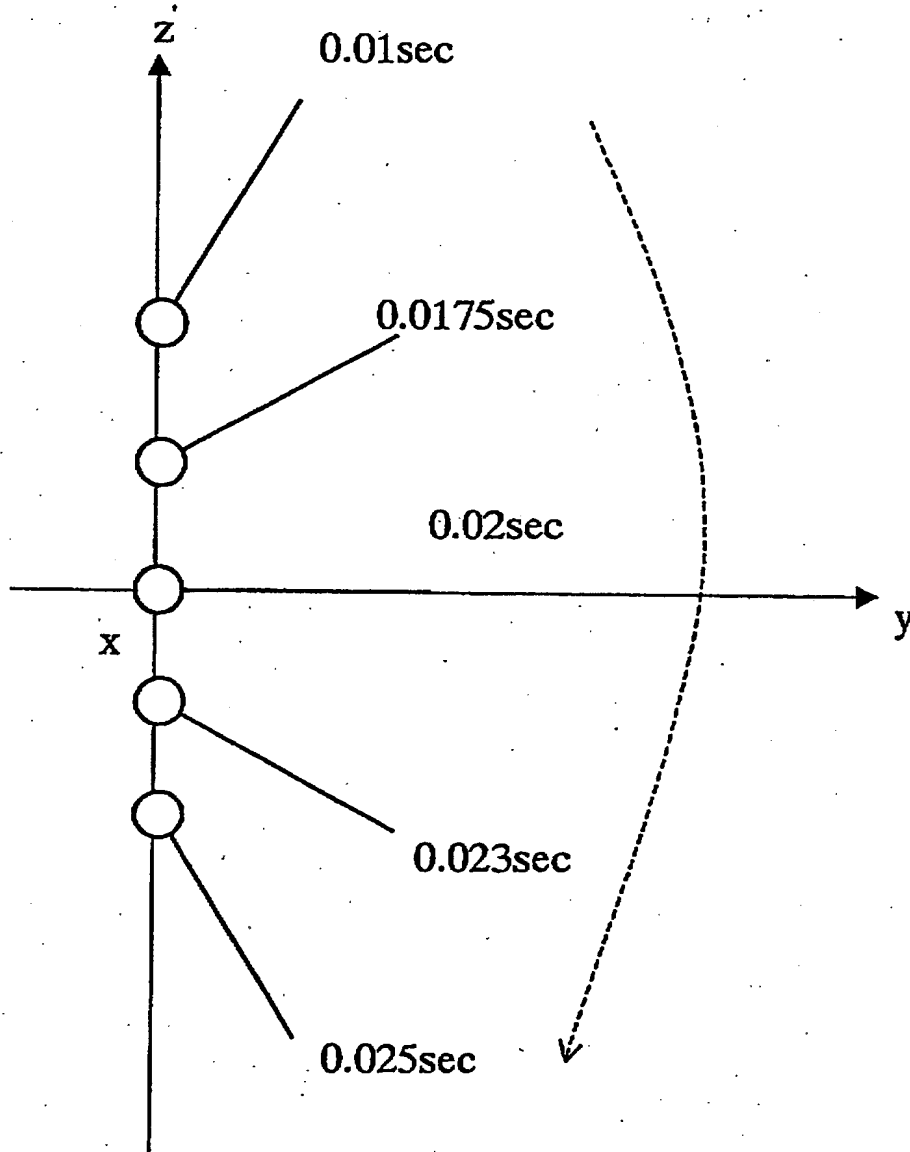
【図 39】



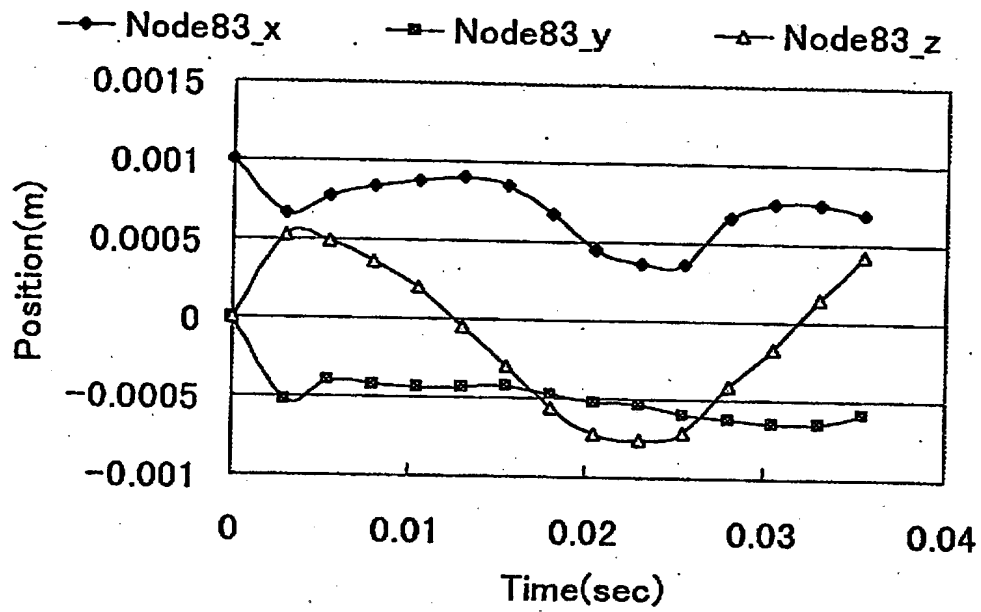
【図 40】



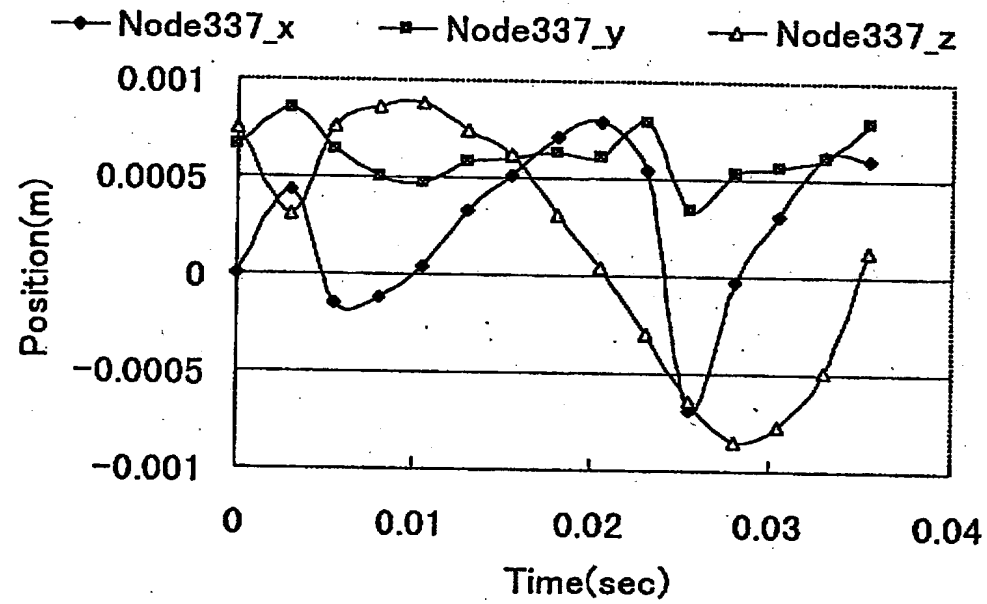
【図 4 1】



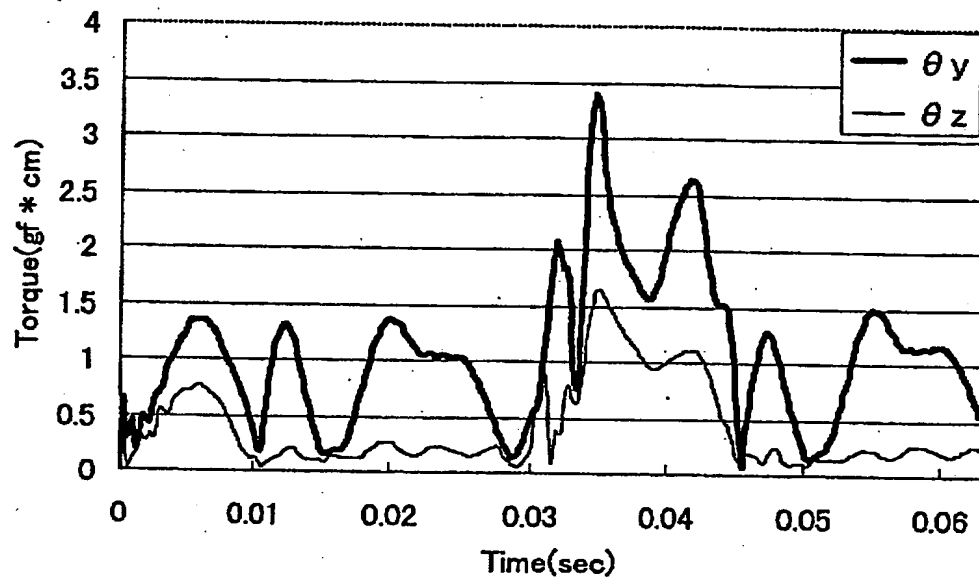
【図 4 2】



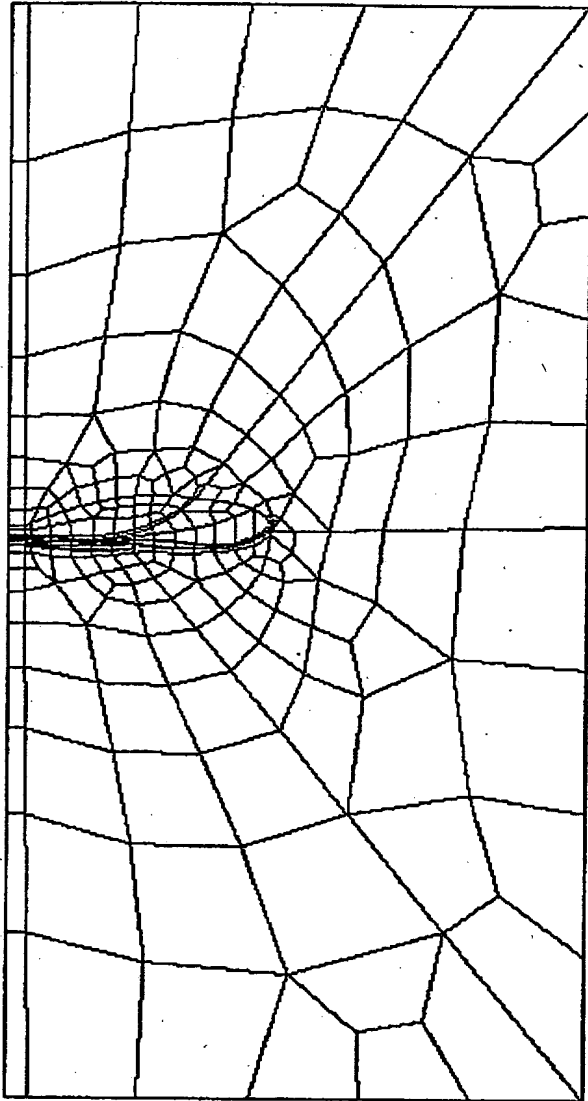
【図 4 3】



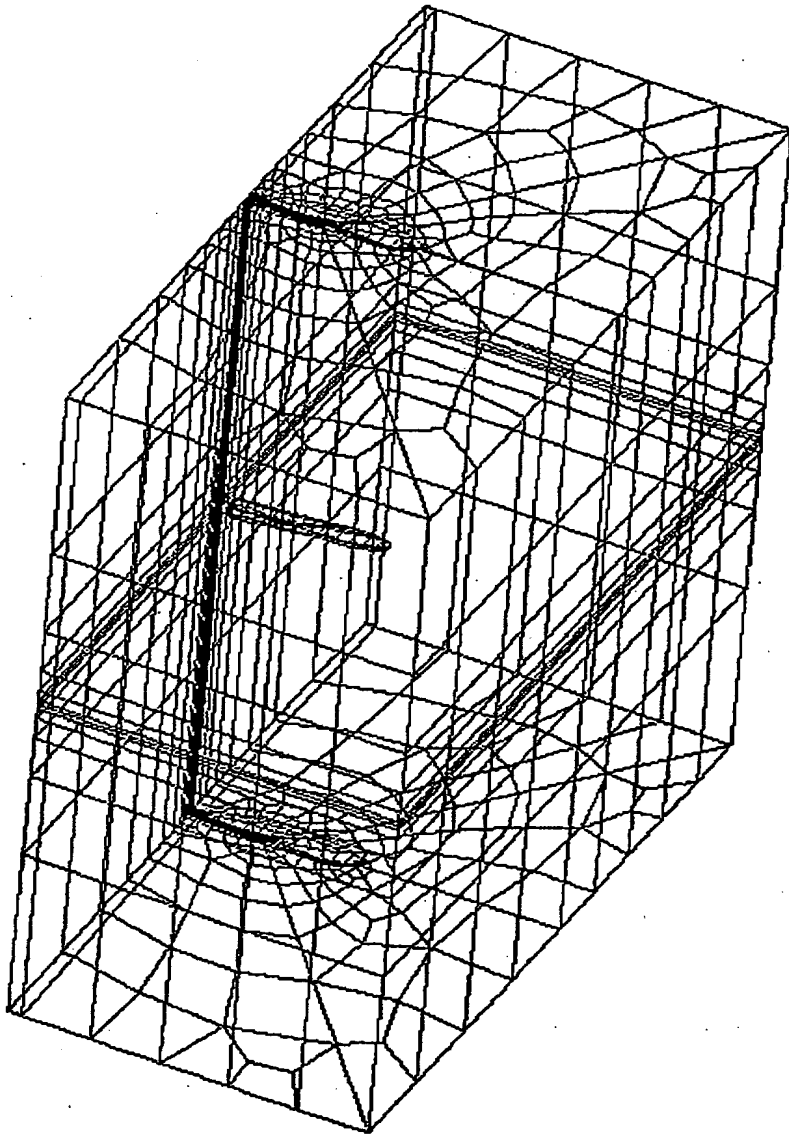
【図 4 4】



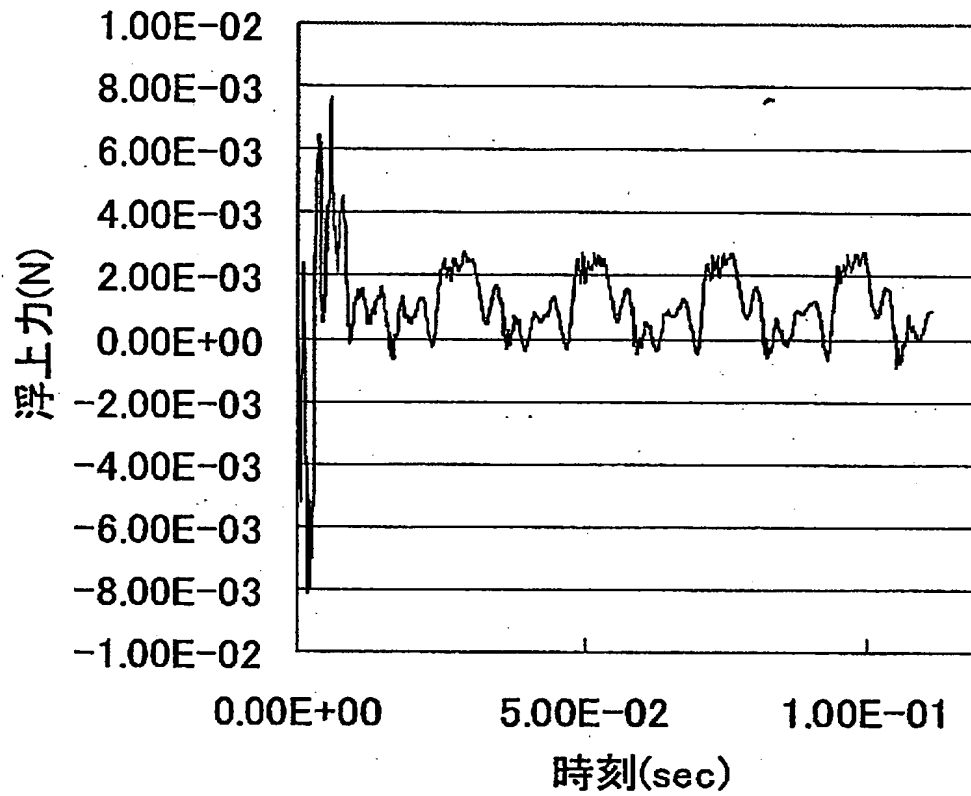
【図 4 5】



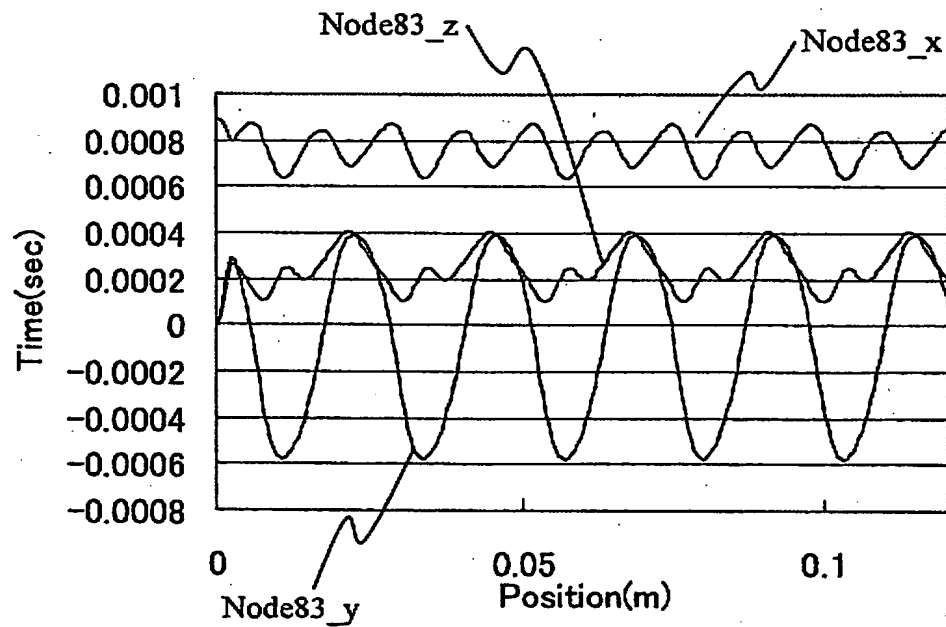
【図 46】



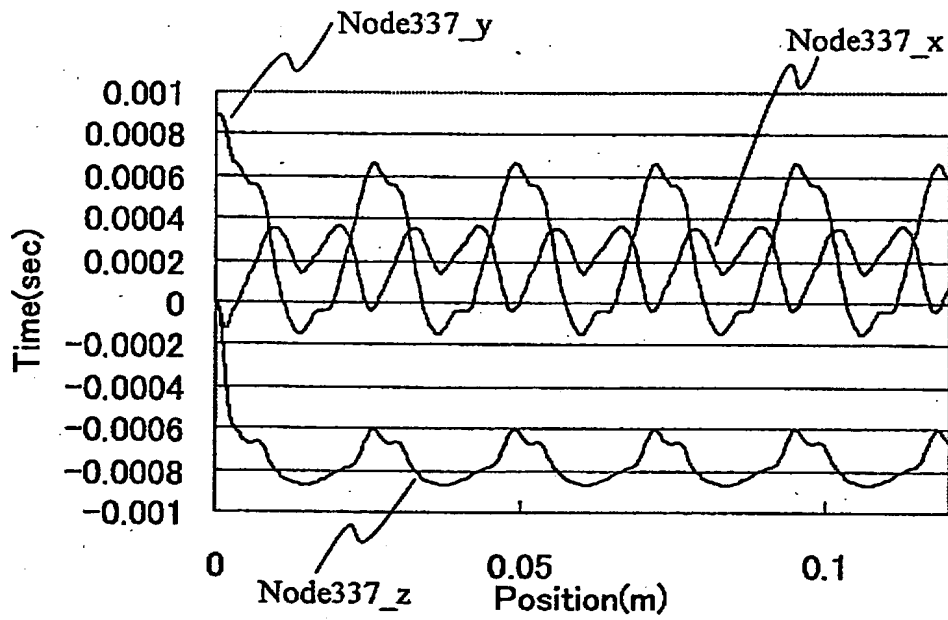
【图 4 7】



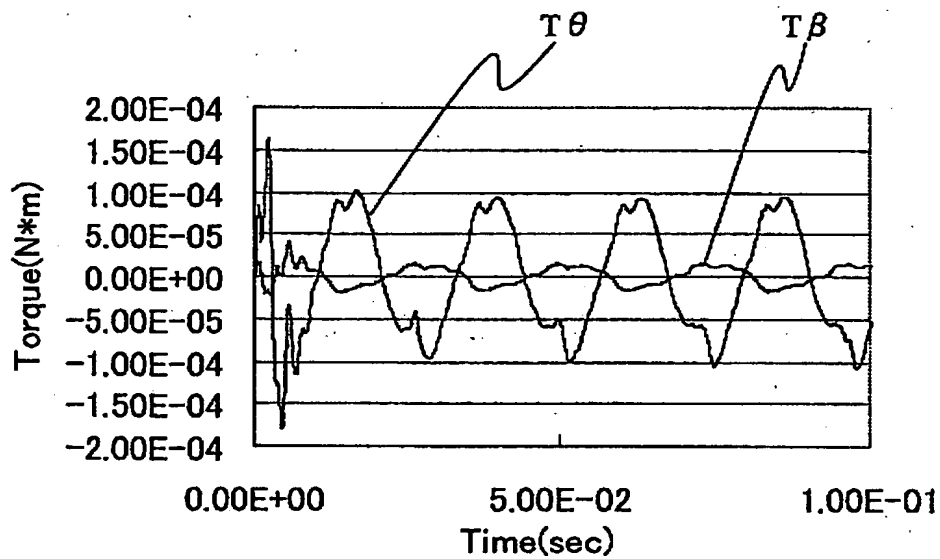
【图 4 8】



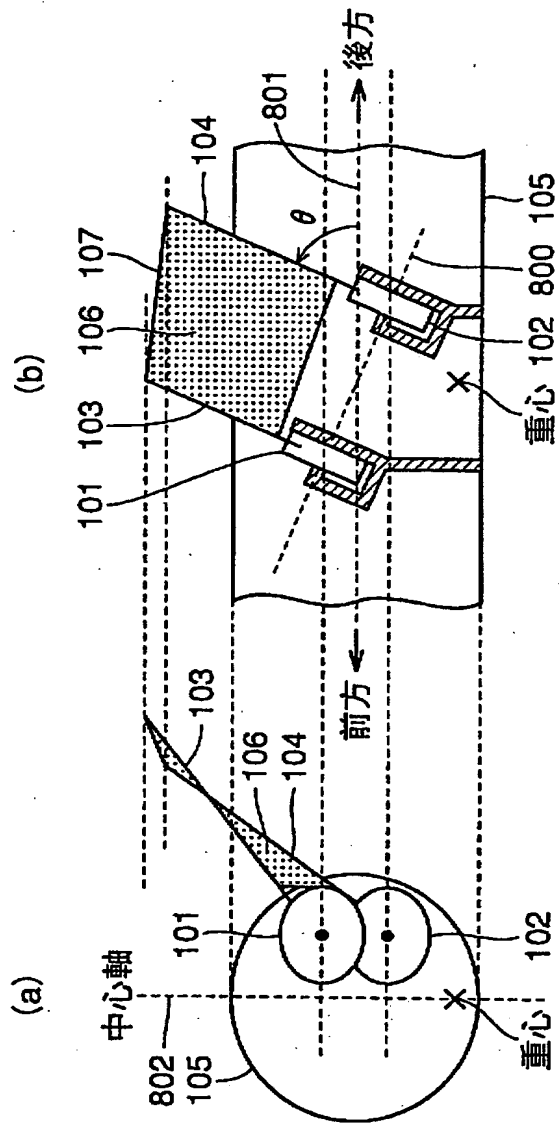
【図 4 9】



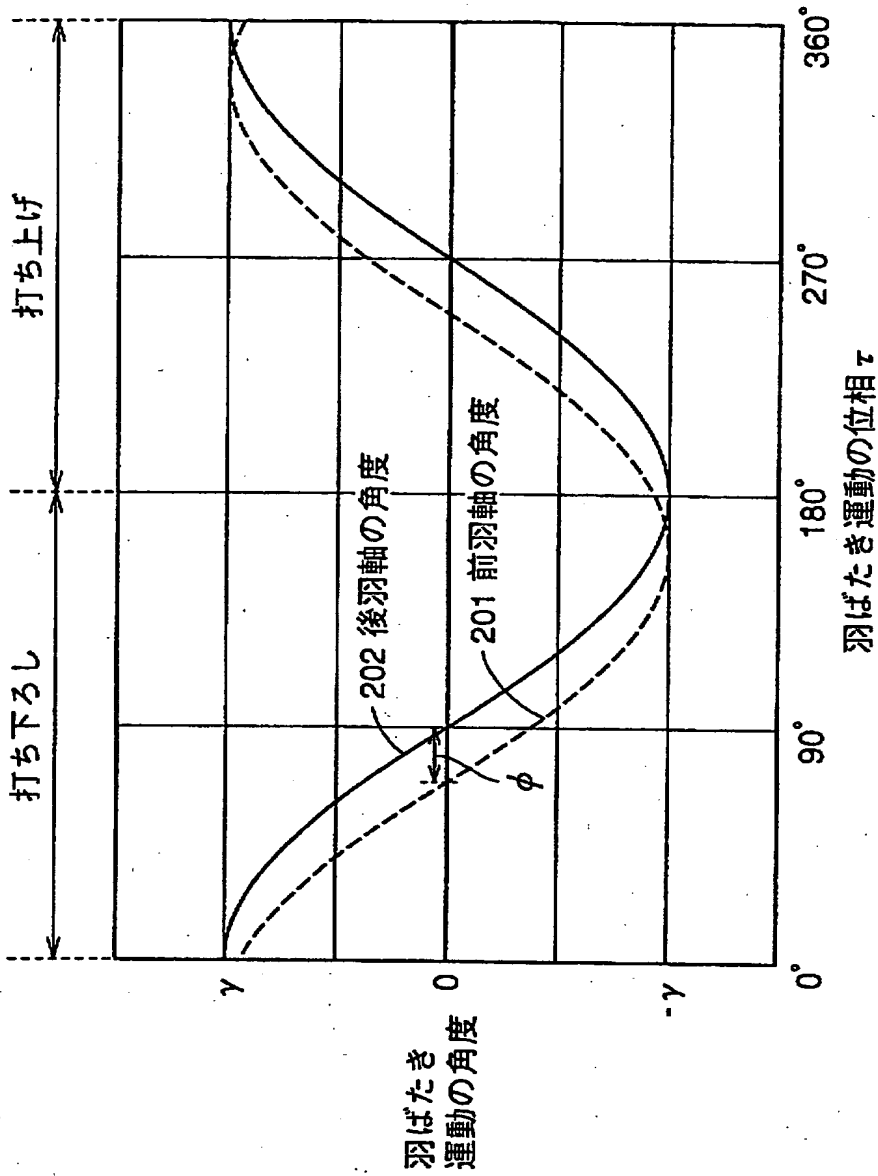
【図 5 0】



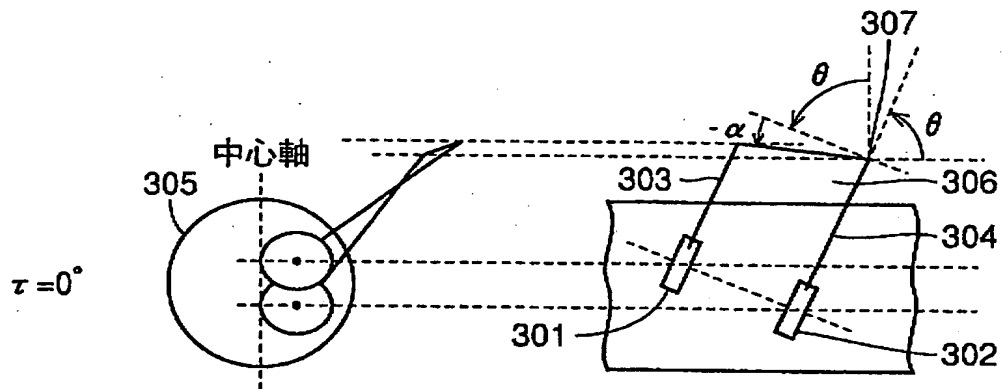
【図 51】



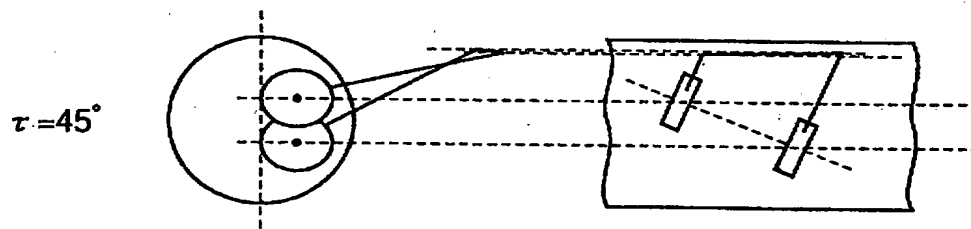
【図 52】



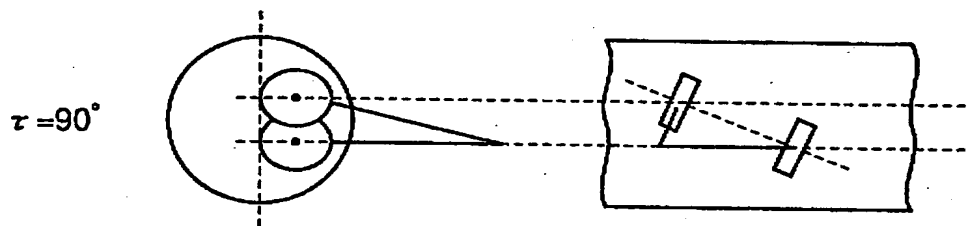
【図 5 3】



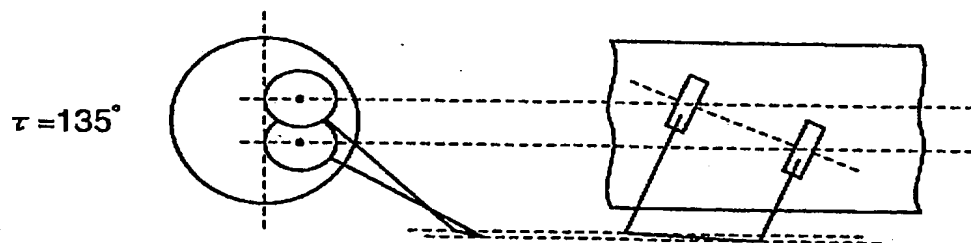
【図 5 4】



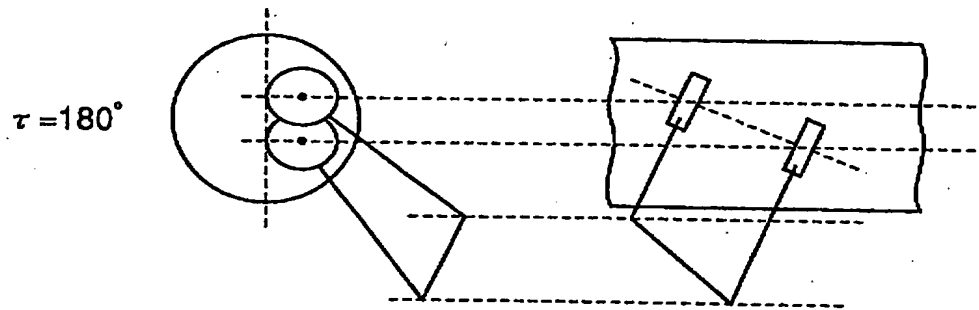
【図 5 5】



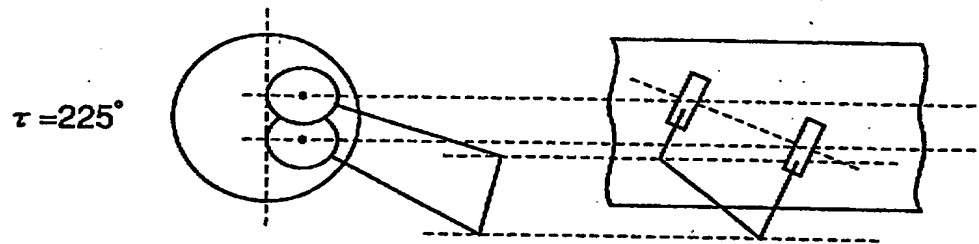
【図 5 6】



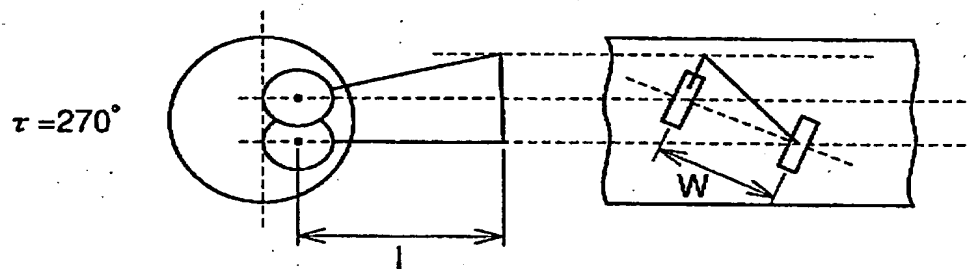
【図 57】



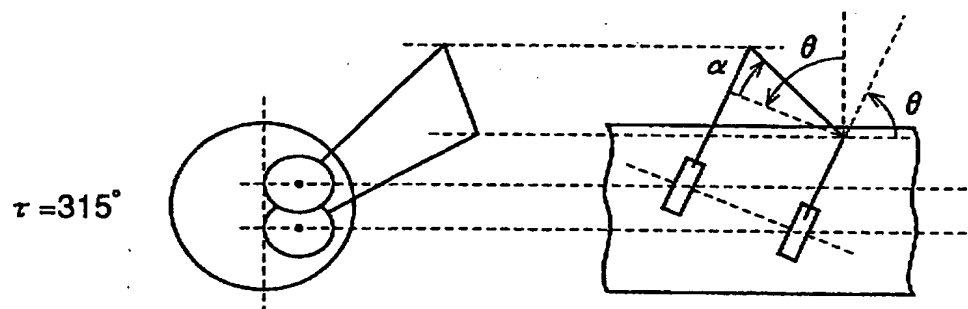
【図 58】



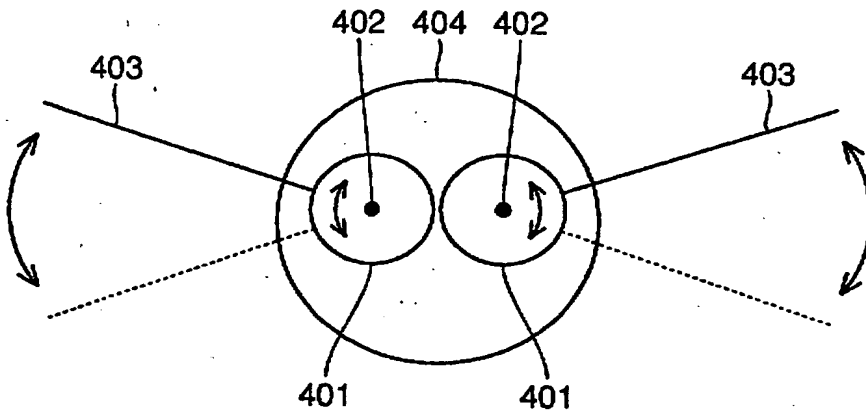
【図 59】



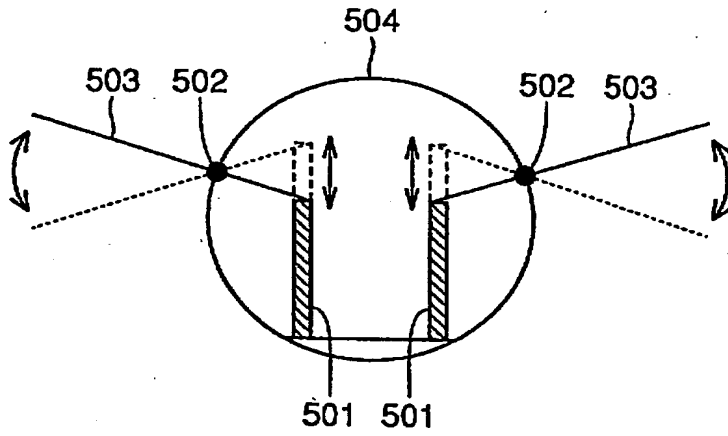
【図 60】



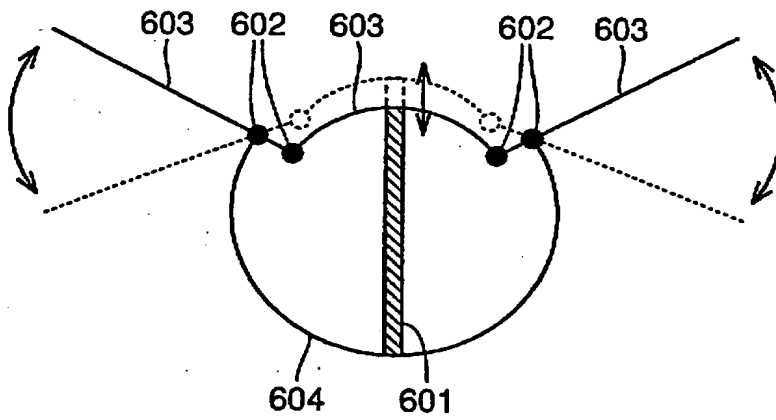
【図 6 1】



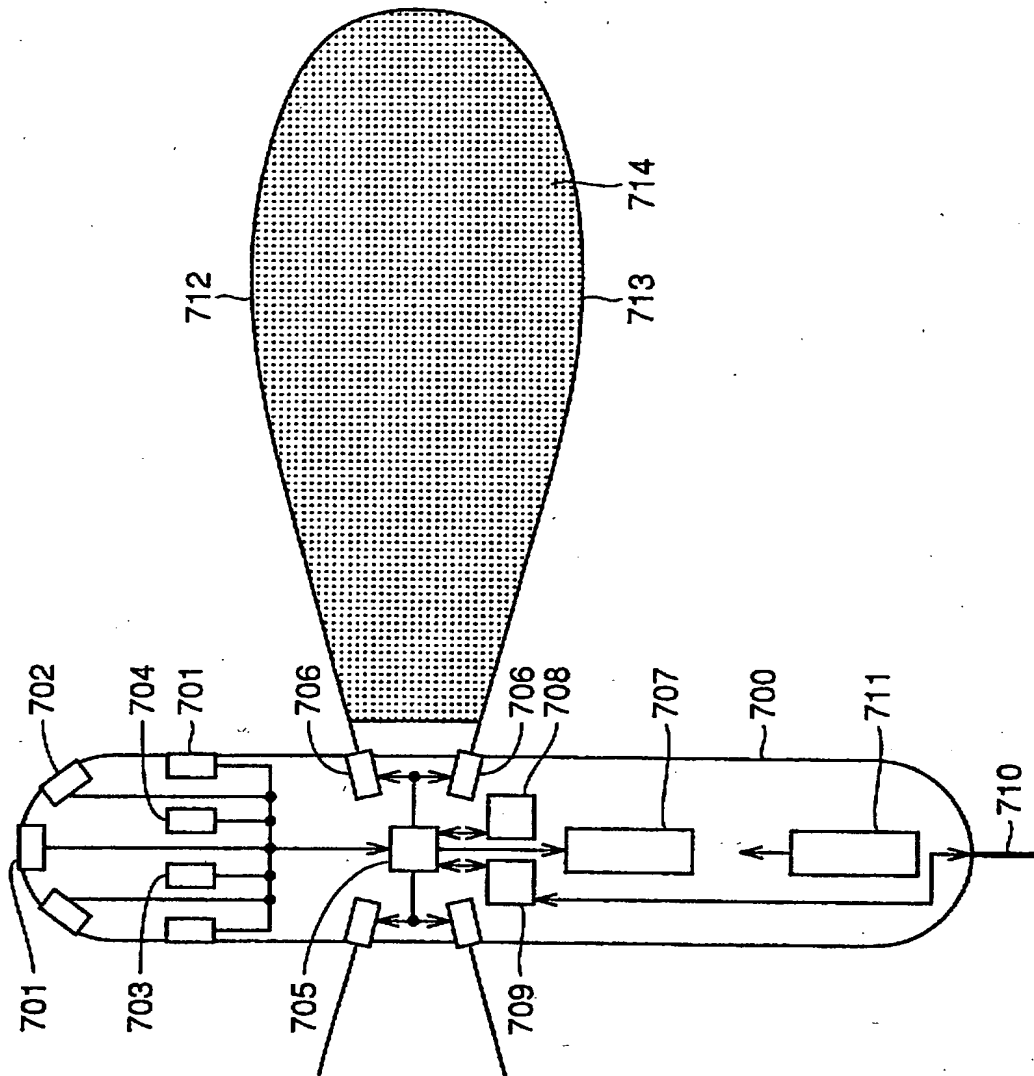
【図 6 2】



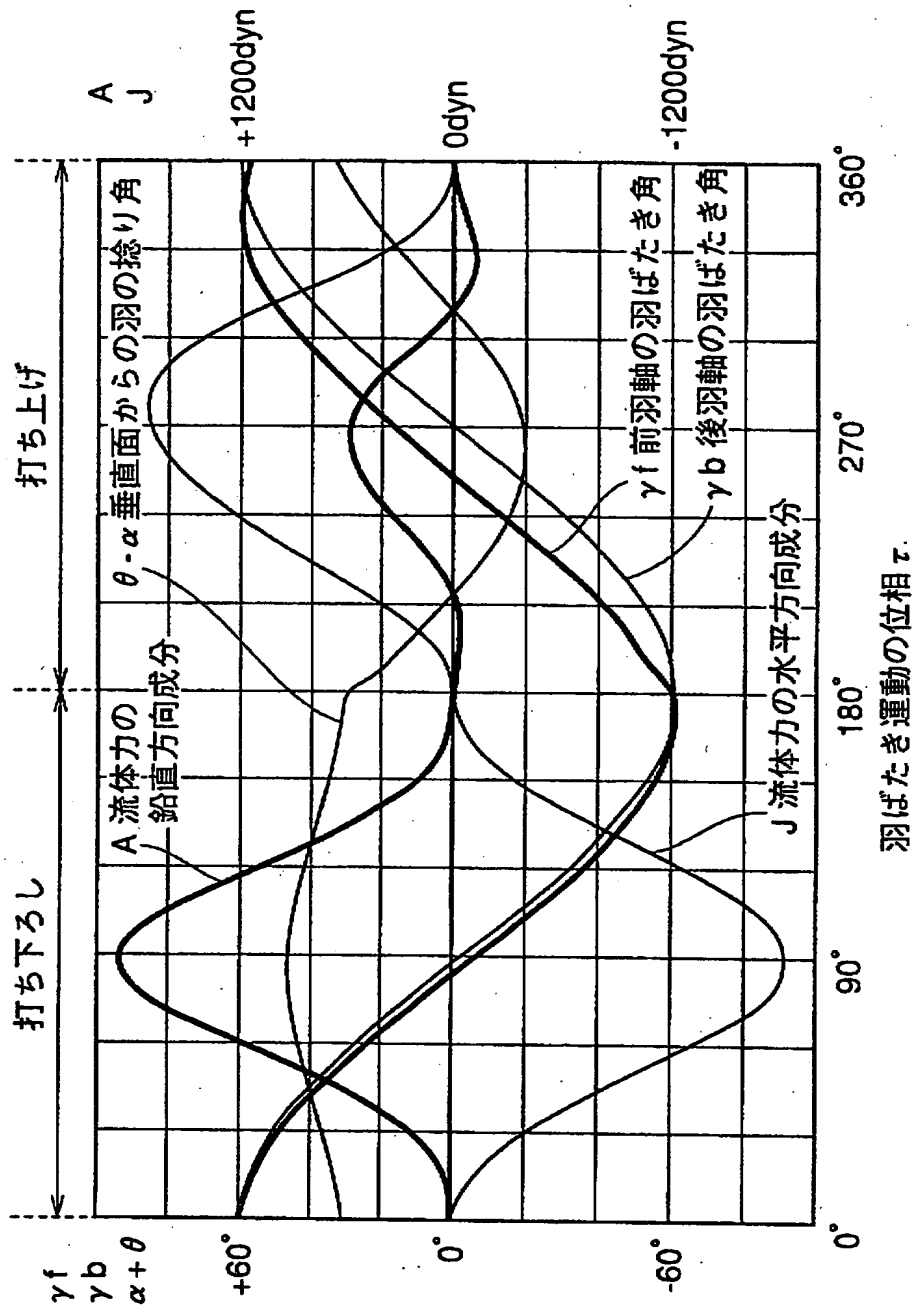
【図 6 3】



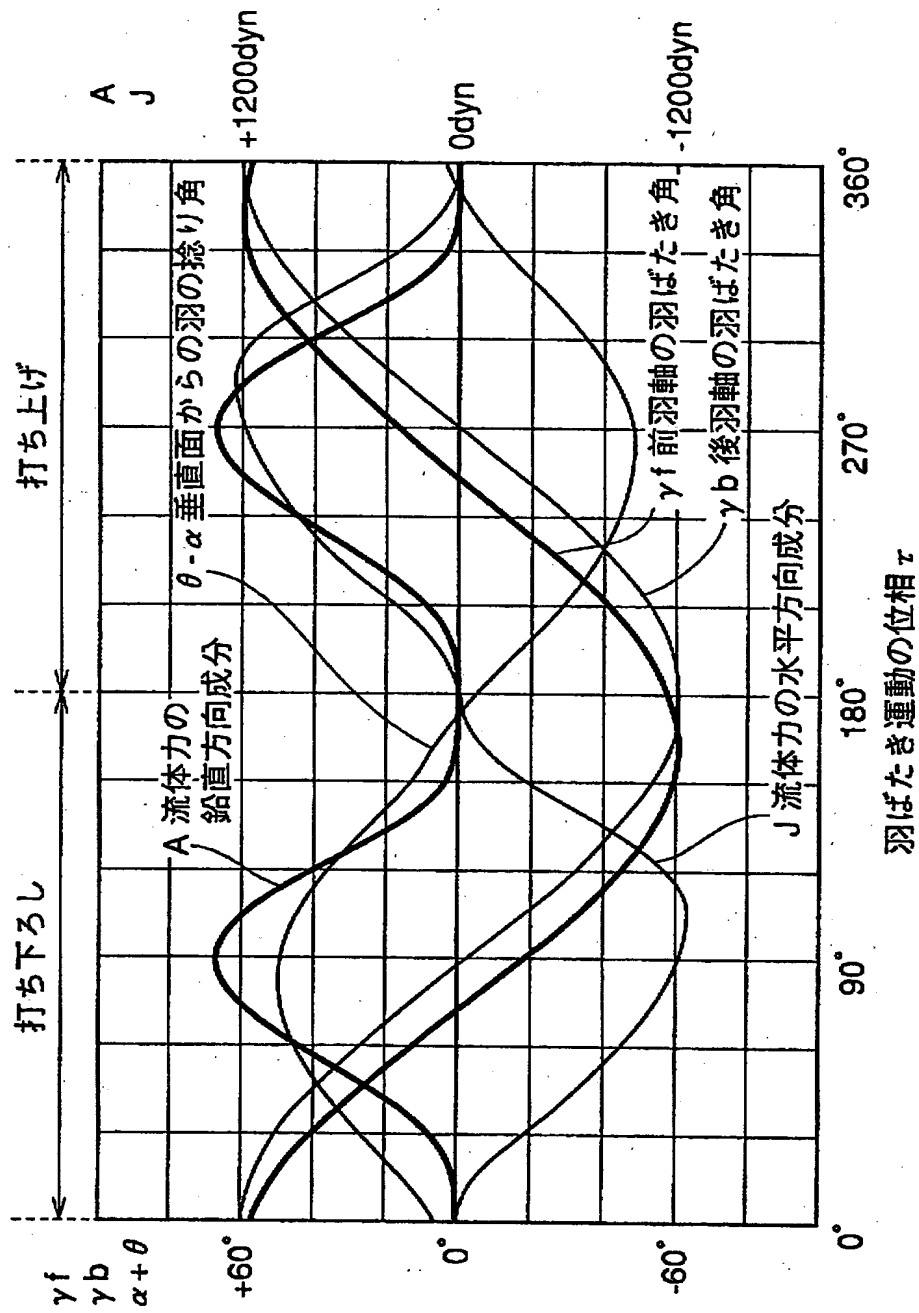
【図 6 4】



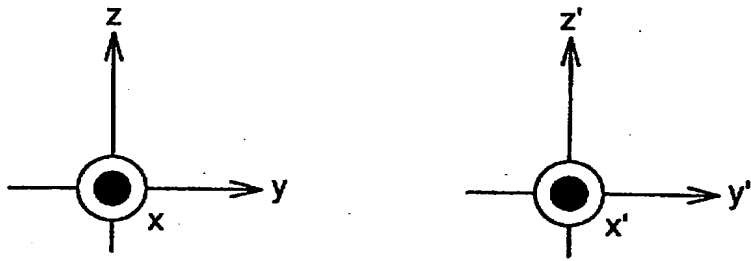
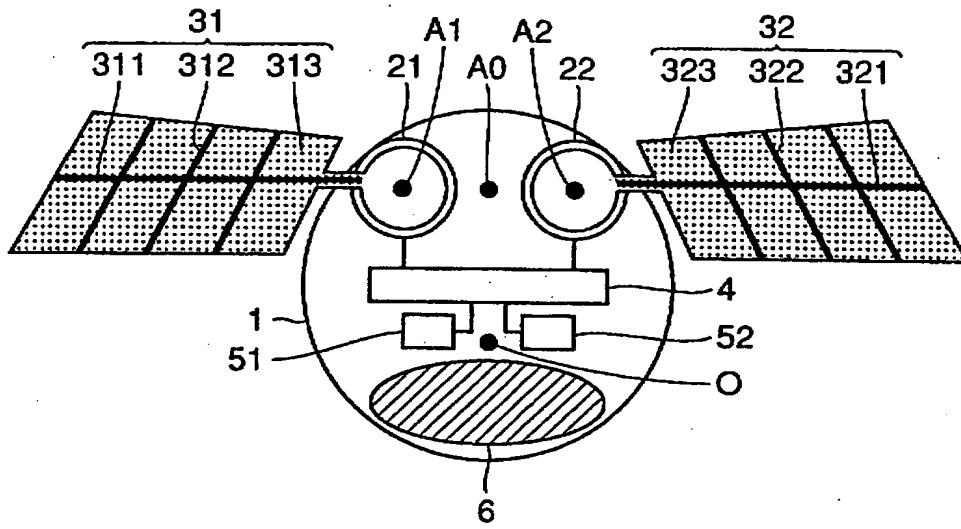
【図 65】



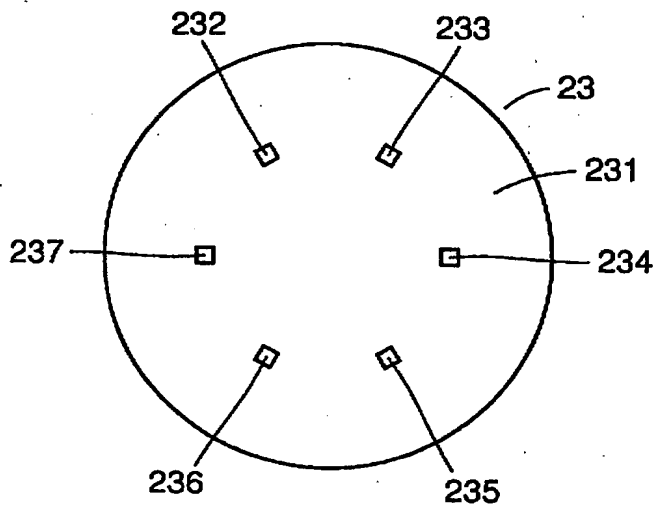
【図 66】



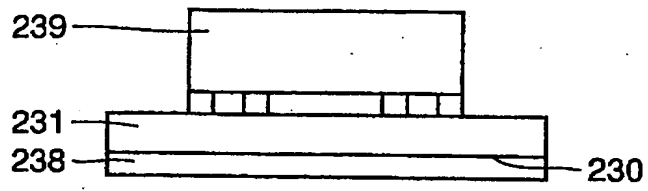
【図 6 7】



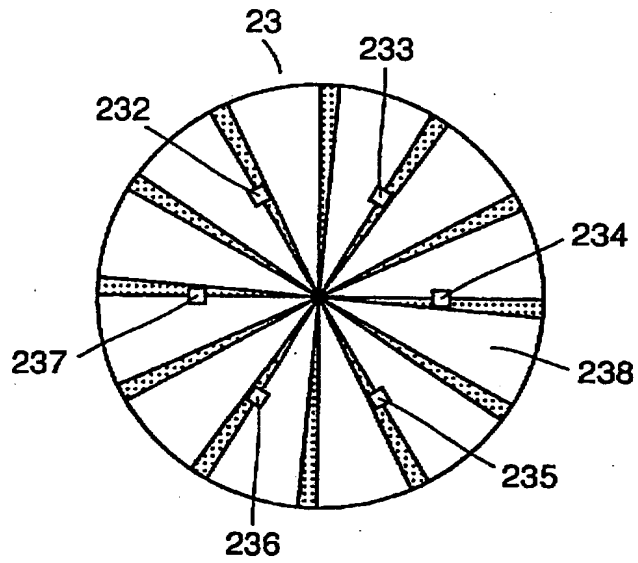
【図 6 8】



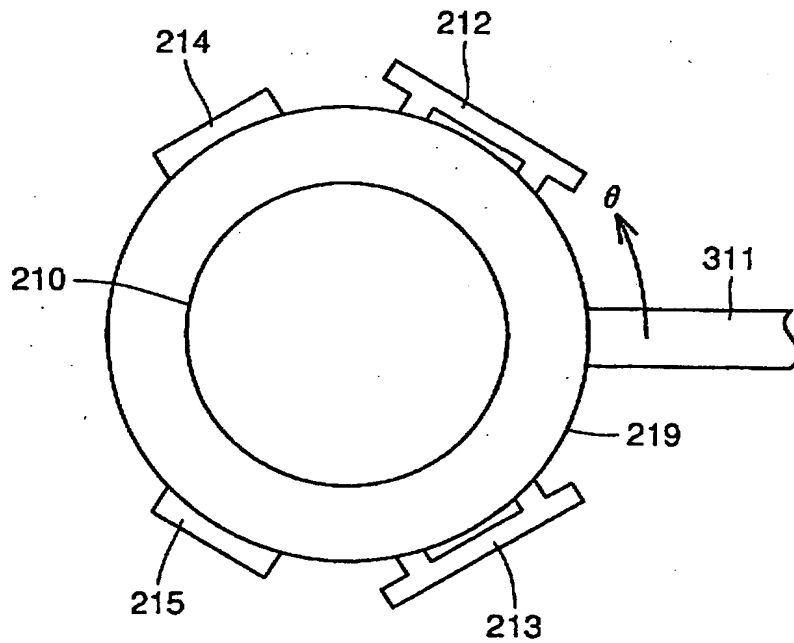
【図 6 9】



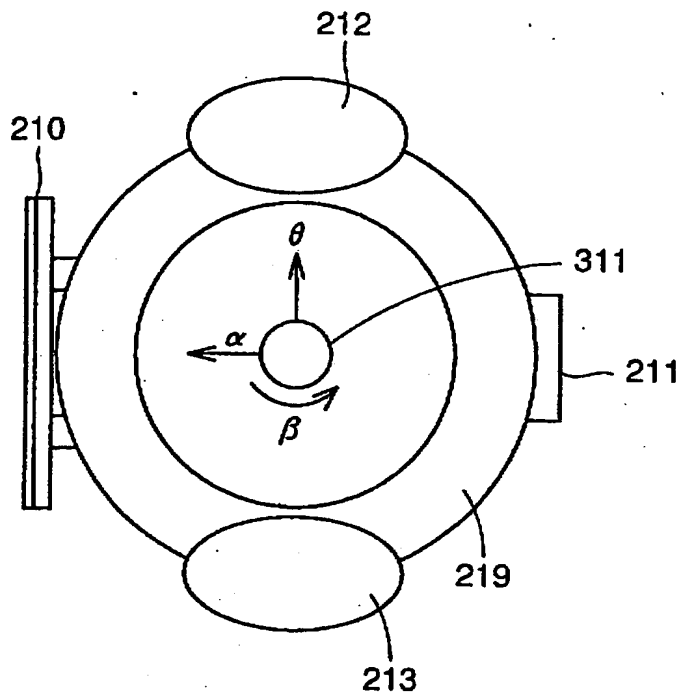
【図 7 0】



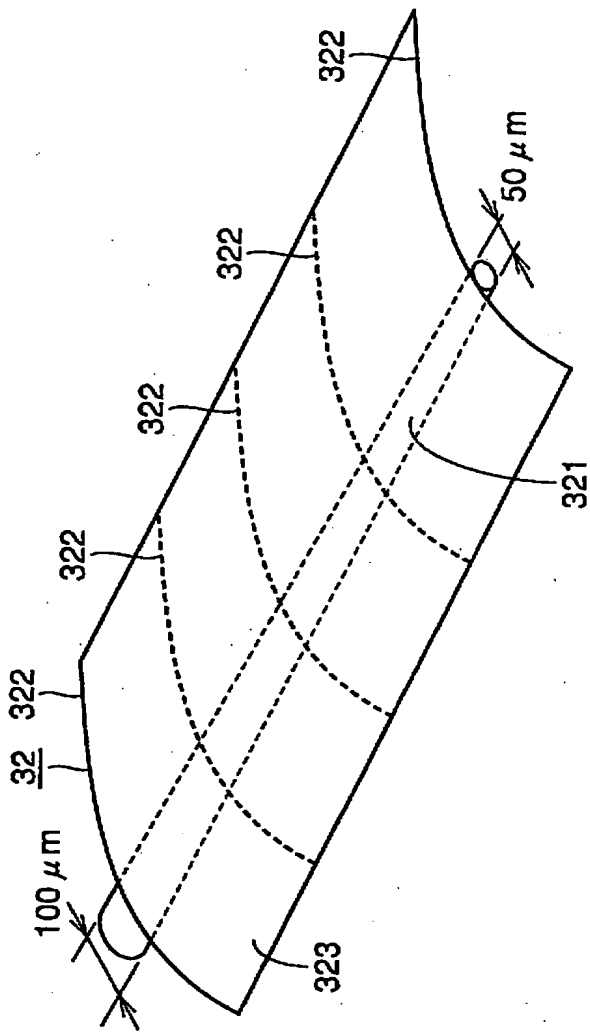
【図 7 1】



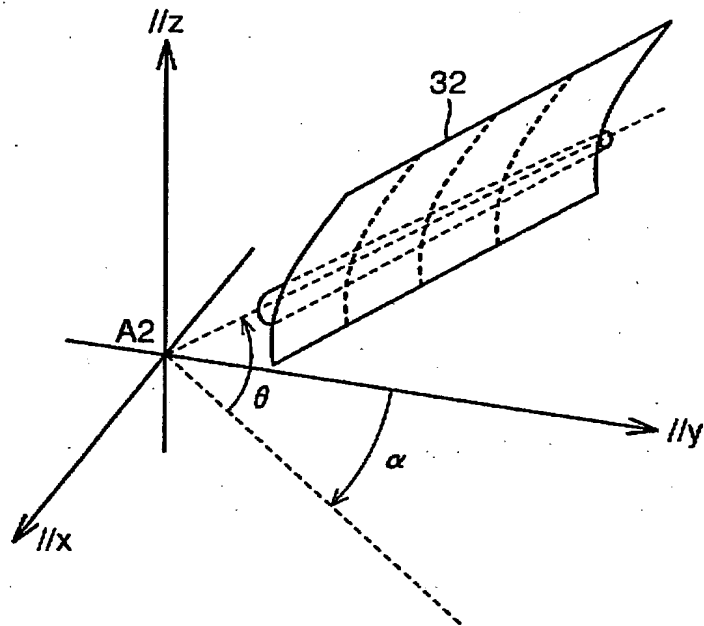
【図 7 2】



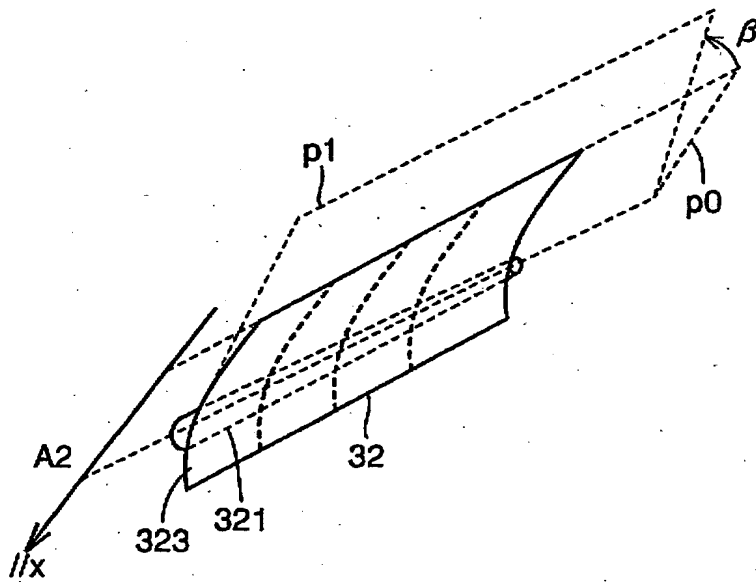
【図 7 3】



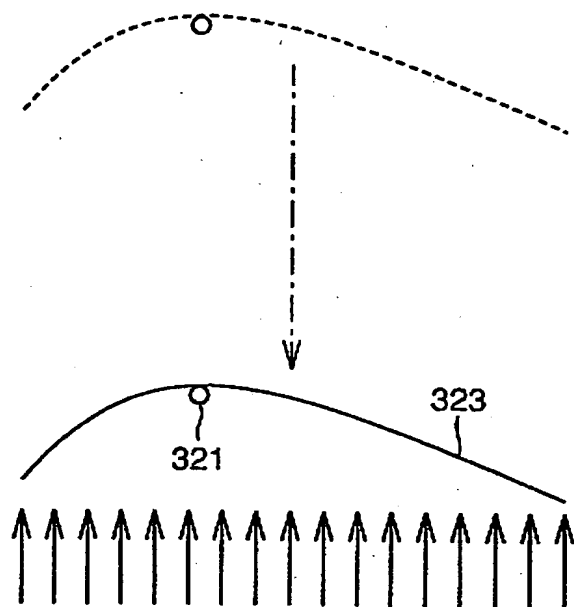
【図 7 4】



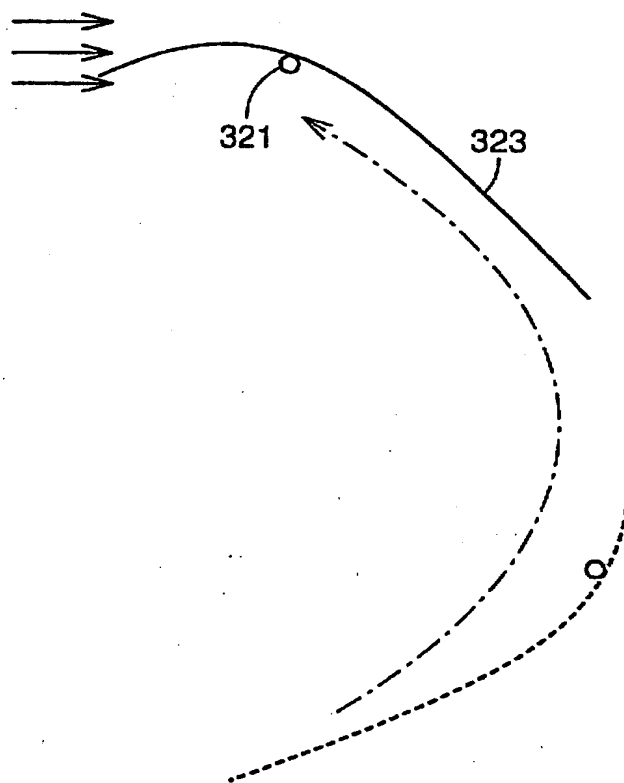
【図 7 5】



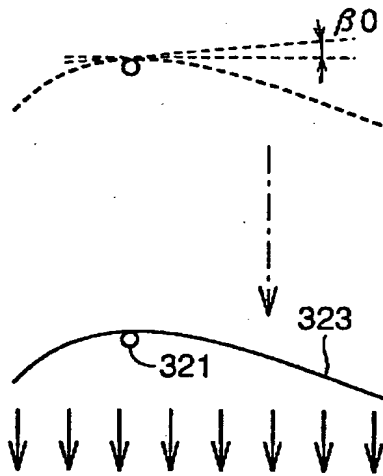
【図 7 6】



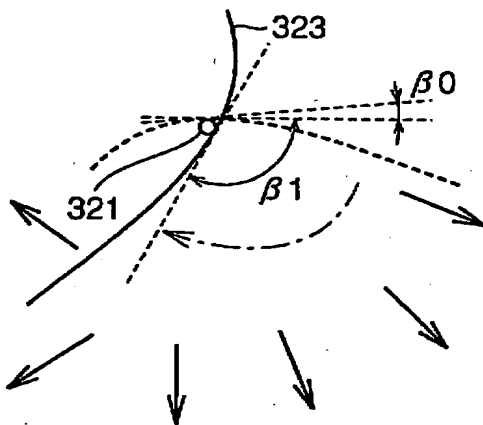
【図 7 7】



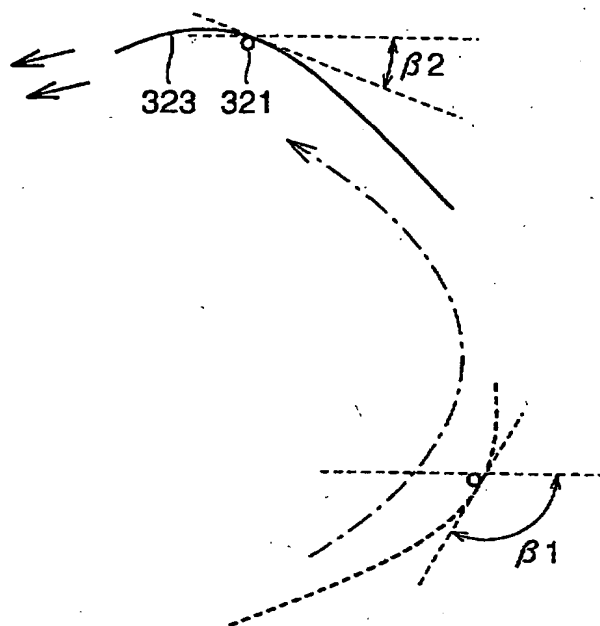
【図 78】



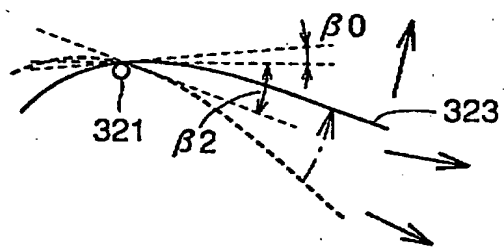
【図 79】



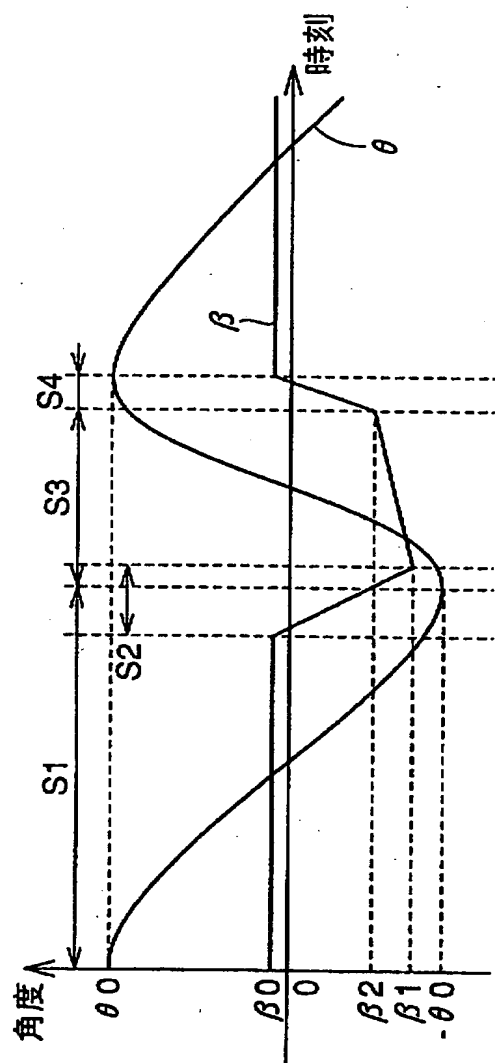
【図 8 0】



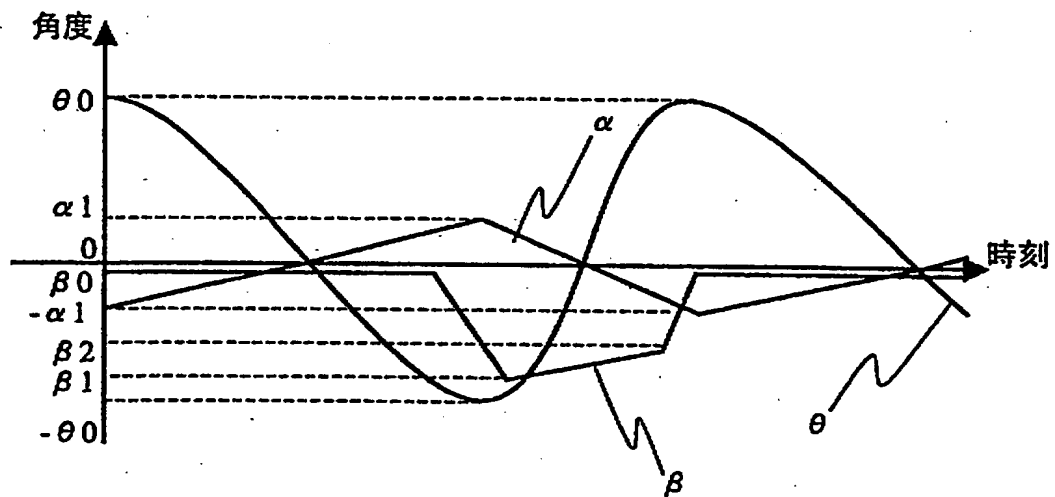
【図 8 1】



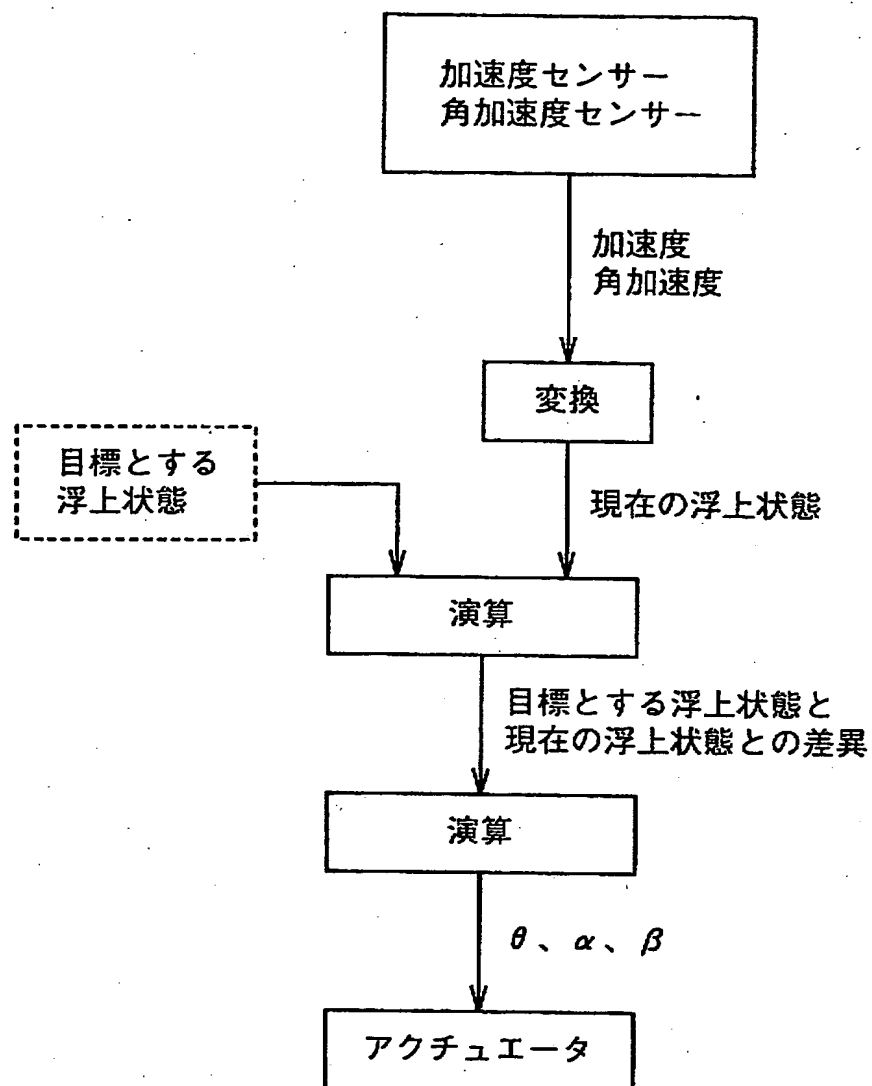
【图 8 2】



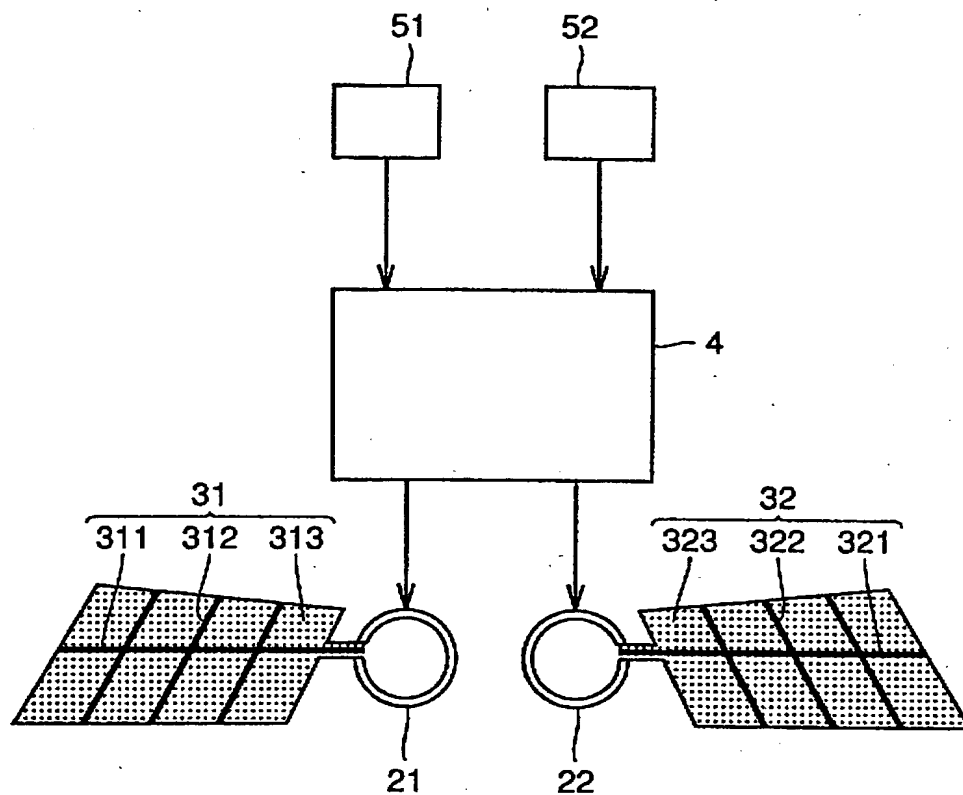
【図 83】



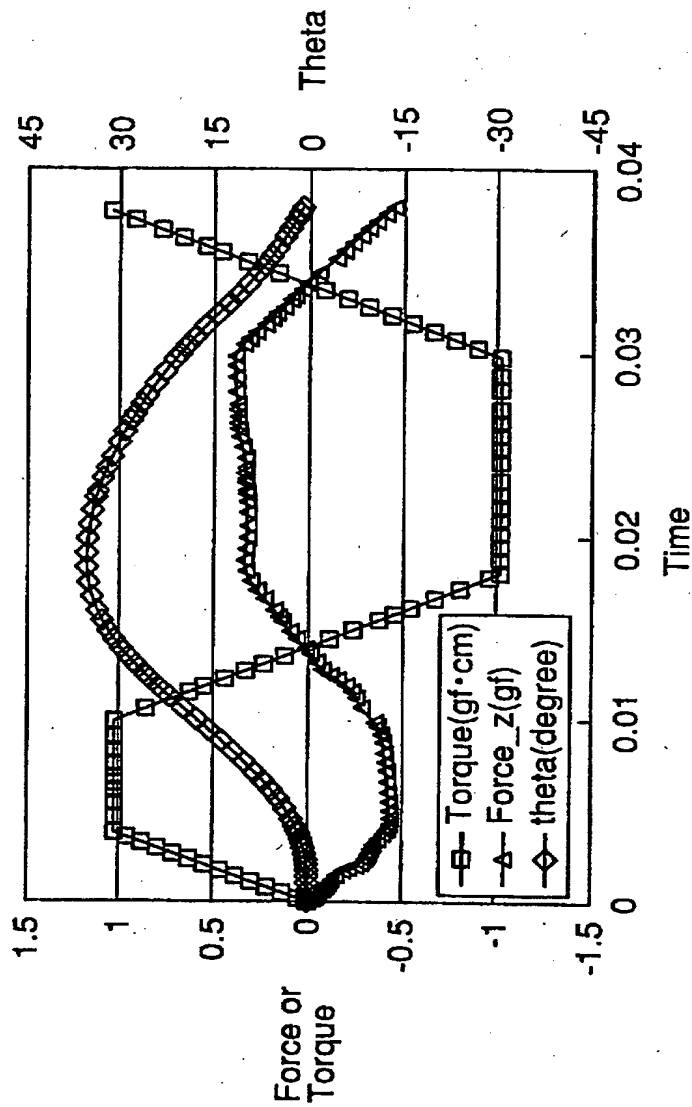
【図 84】



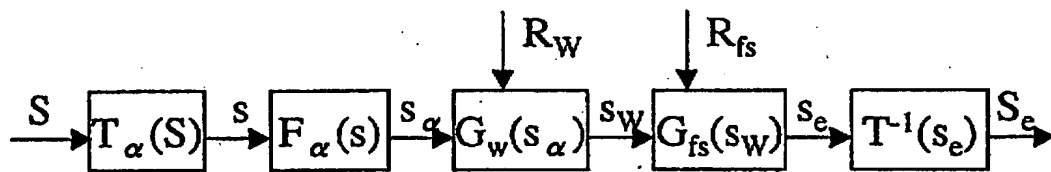
【図 8 5】



【図 86】



【図 87】



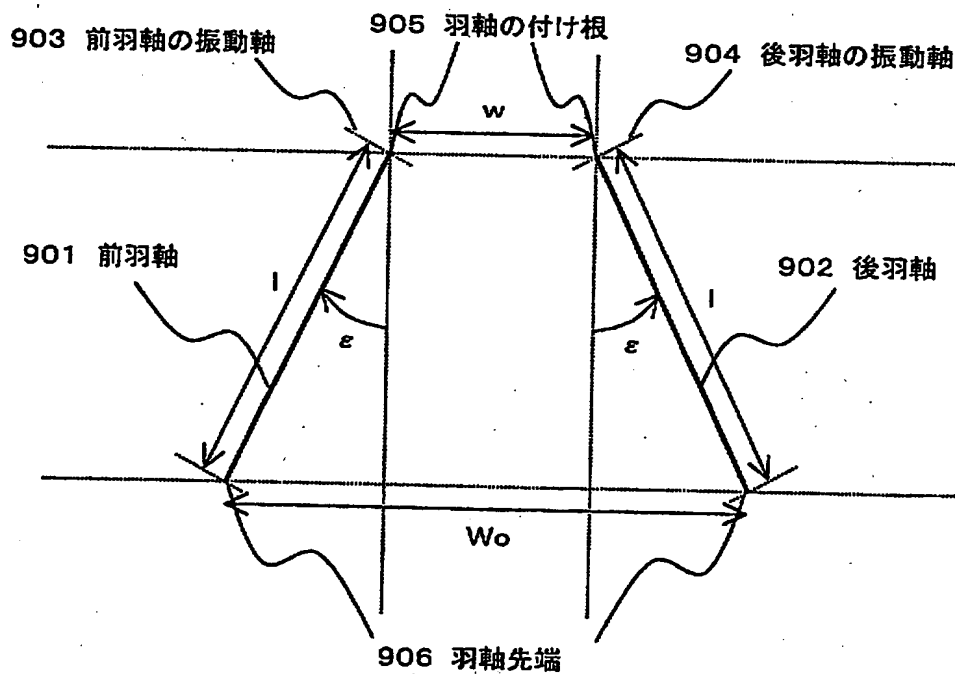
【図 8 8】

		$x'' +$	$x'' -$	$z'' +$	$z'' -$	$\theta_y'' +$	$\theta_y'' -$
S1	θ 振幅大			●			
	θ 振幅小				●		
	$-d\theta/dt$ 大			●			
	$-d\theta/dt$ 小				●		
	$-d\alpha/d\theta > d\alpha_{th}$	●					
	$-d\alpha/d\theta < d\alpha_{th}$		●				
	β が打ち下ろし 方向に垂直			●			
	β が打ち下ろし 方向に垂直でない				●		
	$\beta > 0$	●					
	$\beta < 0$		●				
S2	$-d\beta/dt$ 大	●		●		●	
	$-d\beta/dt$ 小		●		●		●
S3	θ 振幅大				●		
	θ 振幅小			●			
	$d\theta/dt$ 大				●		
	$d\theta/dt$ 小			●			
	$d\alpha/d\theta > d\alpha_{th}$		●				
	$d\alpha/d\theta < d\alpha_{th}$	●					
	β が打ち上げ 方向に垂直				●		
	β が打ち上げ 方向に垂直でない			●			
S4	$d\beta/dt$ 大	●			●		●
	$d\beta/dt$ 小		●	●		●	

【図 89】

	右アクチュエータ		左アクチュエータ	
	周波数	羽ばたき	周波数	羽ばたき
上昇	35Hz	B	35Hz	B
下降	25Hz	B	25Hz	B
前進	30Hz	A	30Hz	A
停空	30Hz	B	30Hz	B
右旋回	30Hz	B	30Hz	A
左旋回	30Hz	A	30Hz	B

【図 90】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 羽ばたき飛行に適した剛性の羽を有する浮上移動装置およびその製造方法を提供する。

【解決手段】 n 種類の羽構造モデルそれぞれを所定の羽ばたき方モデルで羽ばたかせたときの流体・構造連成解析を行う。その解析により、流体の挙動に関する物理量および構造の挙動に関する物理量のデータ1、データ2・・・データ n が算出される。そのデータ1、データ2・・・データ n のうち、浮上力等の所定のパラメータが最適値であるデータを抽出する。その抽出されたデータを導くための羽構造数値モデルの各パラメータの値となる羽部の実物を作成する。駆動部905は、羽部の実物を、前述の羽ばたきモデルにより表現される羽ばたき態様で駆動する。それにより、所定のパラメータが最も優れた数値になる、羽の剛性および羽の羽ばたき方モデルの組合せが実現される。

【選択図】 図1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[000005049]

1. 変更年月日 1990年 8月29日

[変更理由] 新規登録

住 所 大阪府大阪市阿倍野区長池町22番22号

氏 名 シャープ株式会社